



## Action 2 - Prévision des inondations HYDROM A2: Gestion en temps réel des stations hydrométriques   courbes de tarage instables

F. Mendez-Rios, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, Michel Lang

### ► To cite this version:

F. Mendez-Rios, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, Michel Lang. Action 2 - Prévision des inondations HYDROM A2: Gestion en temps réel des stations hydrométriques   courbes de tarage instables. INRAE. 2022. hal-04359897

**HAL Id: hal-04359897**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04359897>**

Submitted on 21 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET DE LA COHÉSION  
DES TERRITOIRES**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022**

**Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques**

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique et de la cohésion des territoires par décision de subvention n°2103680778.



**Action 2 - Prévision des inondations**

**HYDROM A2 : Gestion en temps réel des stations hydrométriques à courbes de tarage instables**

**Auteur : Felipe MENDEZ-RIOS (INRAE, décembre 2022)**

# Table des matières

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>                                          | <b>1</b>  |
| <b>2. Synthèse des travaux 2022 .....</b>                             | <b>1</b>  |
| <b>3. Stations hydrométriques à courbes de tarage instables .....</b> | <b>3</b>  |
| 3.1. Etat des lieux.....                                              | 3         |
| 3.2. Stations étudiées en 2022.....                                   | 3         |
| 3.2.1. Le Sonnant au pont de Venon.....                               | 4         |
| 3.2.1.1. Information fournie par le gestionnaire .....                | 4         |
| 3.2.1.2. Module BaRatin .....                                         | 2         |
| 3.2.1.3. Etude de sensibilité de la segmentation des jaugeages .....  | 6         |
| 3.2.1.4. Principaux résultats.....                                    | 12        |
| 3.2.1.5. Conclusions principales .....                                | 16        |
| 3.2.1.6. Courbes de tarage retenues.....                              | 16        |
| 3.2.2. La Loire à Goudet.....                                         | 18        |
| 3.2.2.1. Analyse BaRatin .....                                        | 19        |
| 3.2.2.2. Résultats BayDERS : segmentation des jaugeages.....          | 20        |
| 3.2.2.3. Résultats BayDERS : segmentation des récessions.....         | 23        |
| 3.2.2.4. Résultats BayDERS : étape finale .....                       | 26        |
| 3.2.2.5. Conclusion principales.....                                  | 28        |
| 3.2.3. La Garonne à Lamagistère .....                                 | 28        |
| 3.2.3.1. Module BaRatin .....                                         | 28        |
| 3.2.3.2. Résultats BayDERS : segmentation par jaugeages.....          | 28        |
| <b>4. Perspectives 2023 .....</b>                                     | <b>35</b> |
| <b>5. Références .....</b>                                            | <b>36</b> |



# 1. Introduction

L'objectif de l'action est d'accompagner le transfert opérationnel des méthodes développées (BayDERS) pendant la thèse de Matteo DARIENZO (2021) pour détecter et estimer les détarages, et de les tester sur différents cas d'étude pour rendre l'outil plus robuste, en détectant des possibles limitations, adaptations et améliorations.

L'actuelle action se concentre sur la gestion des stations hydrométriques à courbes de tarage en associant les incertitudes liées non seulement aux paramètres de la courbe, mais aussi aux débits qu'elles permettent de calculer. De même, l'incertitude peut être aussi associée à une instabilité causée par des processus morphodynamiques (évolution du fond du lit, notamment lors des crues) ou d'autres événements qui génèrent des changements soudains qui affectent la section transversale, en modifiant les contrôles hydrauliques, ce qui provoque des détarages ou des modifications sur la relation hauteur-débit.

L'une des tâches récurrentes mais difficiles à réaliser par l'hydromètre est la détection des détarages tout au long d'une série temporelle à partir d'une étude rétrospective de la station hydrométrique. Pour assister l'utilisateur, la thèse de Matteo Darienzo propose trois méthodes originales afin de détecter des possibles détarages effectifs/potentiels sur la chronique temporelle. Les deux premières méthodes ont pour but d'identifier des détarages effectifs via l'étude des résidus entre les jaugeages et la courbe de tarage, et via l'analyse des récessions vues dans le limnigramme. La troisième méthode se base sur une analyse indirecte (proxy) du transport des sédiments qui a pour but de détecter des détarages potentiels causés par des crues morphogènes.

## 2. Synthèse des travaux 2022

Afin de poursuivre les adaptations et l'amélioration de l'outil, plusieurs cas d'étude ont été étudiés tout au long de l'année 2022. En effet, les méthodes ont été mises en place sur les suivantes stations : Le Sonnant au Pont de Venon (collaboration avec Christophe Rousseau de l'IGE), La Loire à Goudet, La Dunières à Sainte-Sigolène-Vaubarlet, Le Chapeauroux à Saint-Bonnet-de-Montauroux, L'Allier à Prades (collaboration avec David BESSON et Gauthier CORDEAU de la DREAL Centre-Val de Loire) et La Garonne à Lamagistère (collaboration avec Michel Lang, INRAE).

1. Segmentation à partir de l'étude des résidus des jaugeages avec leur incertitude à la courbe de tarage :
  - Mise en place sur toutes les stations mentionnées précédemment afin de vérifier l'adaptabilité et polyvalence de la segmentation sur différentes stations hydrométriques
  - Etude de sensibilité aux paramètres sur la station du Sonnant en comparant 33 scénarios de paramétrage différents
  - Mise en pratique des nouvelles fonctionnalités et avancées développées pour l'optimisation de la segmentation
  - Identification des paramètres qui peuvent évoluer ou être modifiés pour faciliter l'étape des données d'entrée
  - Etude de sensibilité de la méthode BaRatin-SPD intégrée directement dans BayDERS
2. Analyse des récessions du limnigramme :
  - Implémentation sur certaines stations qui ont montré quelques adaptations et ajustements à réaliser pour le bon déroulement de la méthode
  - Article en préparation afin d'évaluer et comparer tous les modèles de récessions disponibles sur la segmentation à différentes valeurs du seuil Chi qui va définir la fin d'une récession et le démarrage de l'autre
  - Amélioration du code afin d'établir et de fixer certains paramètres par défaut afin de rendre l'outil plus simple du côté utilisateur
3. Analyse du transport solide :
  - Compréhension du principe et pistes de stabilisation de la méthode
  - Identification de certains cas d'étude où la mise en place de l'analyse peut poser des problèmes à cause du matériau présent *in situ* (détarage en continu à cause de la mobilisation du fond du lit)
4. Conclusions
  - Segmentation à partir de l'étude des résidus de jaugeages avec leur incertitude à la courbe de tarage :
    - o Mise en évidence la bonne performance de la méthode de segmentation. Néanmoins, il manque encore de guide pour définir les a priori sur les détarages, car cela va parfois provoquer des changements importants
    - o Bonne performance du BIC par rapport aux autres critères de segmentation. Le critère DIC est aussi adapté

- notamment lors d'utilisation du bayésien
- Priorisation des a priori larges afin de ne pas limiter la méthode d'identifier la distribution a posteriori
- Mise en avant l'intérêt de lancer une segmentation binaire (recherche d'un seul détarage, soit 2 segments, par itération) ou maximum 3 segments afin de limiter la sur segmentation
- Temps de calcul acceptables pour l'application opérationnelle
- Mise en avant de l'intérêt d'utiliser le paramétrage suivant pour la version actuelle de BayDERS :
  - Critère de segmentation : BIC / DIC
  - Segmentation : binaire ou 3 segments maximum
  - Méthode d'ajustement des instants de détarage: détarage associé à la crue la plus importante qui se repère sur l'intervalle de crédibilité du MAP
  - A priori : éviter de mettre des valeurs trop restreintes et prioriser plutôt les intervalles larges
- Un intérêt a été suscité sur la mise en place de BaRatin-SPD afin de valoriser l'information disponible dans d'autres périodes pour mieux estimer les courbes de tarage de chaque période.
- Analyse des récessions du limnigramme :
  - Priorisation des récessions longues afin de suivre les hypothèses de base de la méthode
  - Besoin d'optimiser l'extraction des récessions pour fiabiliser et accélérer le calcul
  - Besoin d'un guide opérationnel plus détaillé que l'existant afin de pouvoir encadrer l'utilisateur sur les choix des paramètres
  - Réglage des paramètres par défaut ou estimer à partir des données d'entrée afin de diminuer la quantité de paramètre à caler par l'utilisateur
  - Temps de calcul très élevé, cela va être en fonction de la résolution temporelle et la durée de la série temporelle
  - Priorisation de l'utilisation des modèles de récession exponentiels
- 5. Perspectives :
  - Refonte de BayDERS pour le simplifier et qu'il peut être mise en pratique par des utilisateurs inexperts
  - Stabiliser les différentes segmentations proposées et progresser sur le transfert opérationnel de l'outil BayDERS en établissant des paramétrages par défaut
  - Mettre en place des nouveaux cas-tests aussitôt les méthodes sont stables. Certains cas ont été déjà identifiés et d'autres doivent encore être contactés. Parmi eux, il se trouve la DEAL Guadeloupe et le SENAMI en Bolivie
  - Utilisation du package *RBaM* pour l'écriture automatique des fichiers de configuration
  - Développement d'une méthode pour la cohérence entre les dates de détarages obtenues par les méthodes
  - Scindement de BaRatin-SPD de BayDERS puisque la méthode SPD est dans l'étape finale de son opérationnalisation
  - Perspectives plus en détail par méthode de segmentation :
    - Segmentation à partir de l'étude des résidus des jaugeages avec leur incertitude à la courbe de tarage:
      - Mise en place l'option de découpage à partir d'une étude des résidus relatifs
      - Adoption d'une méthodologie qui servira à choisir l'a priori de l'ensemble des données (notamment le résidu moyen) à partir d'une statistique qui fournit une première approche
    - Analyse des récessions du limnigramme :
      - Identification des relations possibles parmi les différents paramètres de sorte qu'ils soient calculés à partir d'autres données d'entrée.
      - Etude de l'interaction entre le seuil Chi et l'espacement maximal entre deux données consécutives afin de trouver une relation pour que les récessions soient plus longues.
      - Etude de sensibilité des paramètres
      - Mettre en place l'analyse de type récursif pour réaliser la détection de détarages
    - Analyse du transport solide :
      - Mettre en place sur différentes stations hydrométriques qui suivent les hypothèses de base de la méthode

## 3. Stations hydrométriques à courbes de tarage instables

### 3.1. Etat des lieux

Grâce à la thèse de Matteo DARIENZO (2017-2020), des travaux ont été faits pour gérer en temps réel des courbes de tarage instables (effets morphodynamiques) qui propose trois méthodes pour l'analyse et détection de détarages. D'après le rapport SCHAPI HYDROM 2021, plusieurs stations hydrométriques ont été testées sur BayDERS telles que l'Ardèche à Meyras (station de la thèse), le Congo à Brazzaville-Kinshasa (collaboration avec Jérôme Le Coz, INRAE), Le Rhône à Beaucaire (collaboration avec Mathieu Lucas, INRAE), Tinley Creek Illinois (collaboration avec Thomas Over, USGS), le Rhin à Bâle (collaboration avec Michel Lang, INRAE). Ces applications ont permis de réaliser des avancées, adaptations et modification du code source pour améliorer et stabiliser les méthodes.

Etant donné que l'un des objectifs est le transfert opérationnel de l'outil, en 2021 un guide BayDERS V.1.0.0 a été développé afin d'expliquer la façon comme l'outil fonctionne et la manière de paramétrer les fichiers de configuration pour lancer l'étude. De même, il explique aussi quelques fichiers résultats proprement à chaque type de segmentation, ainsi que leur interprétation pour que l'utilisateur comprenne et critique les données et si c'est le cas, juger si les données d'entrée ont été bien choisies.

Puisque l'outil est encore très récent, de possibles limitations et instabilités peuvent se rencontrer au niveau du code. C'est pour cela que l'objectif de cette année était de tester BayDERS sur différentes stations hydrométriques pour trouver des cas d'étude qui peuvent mettre à l'épreuve le code pour étudier les contraintes et ensuite, faire évoluer et stabiliser la méthode pour qu'elle soit plus robuste.

BayDERS dispose de trois méthodes de segmentation différentes avec leurs propres paramètres. La première segmentation est basée sur l'étude des résidus des jaugeages avec leur incertitude à la courbe de tarage et les paramètres plus importants à régler sont l'écart-type du résidu moyen du jaugeage à la courbe, le critère de segmentation et le nombre maximum de segments identifiables par l'outil.

La segmentation suivante porte sur l'analyse du limnigramme pour détecter des changements du fond du lit via la descente du niveau d'eau après crue. Les paramètres à établir sont le seuil « Chi » qui va déterminer la fin d'une récession et le démarrage de l'autre et la longueur minimale en jour d'une récession pour qu'elle soit considérée dans l'analyse.

Enfin, la dernière segmentation est basée sur l'analyse du transport solide qui permet de détecter des détarages potentiels en fonction de la quantité de matériel mobilisé. Cette étude est réalisée à partir d'une hauteur critique qui indique le démarrage de la mobilisation des sédiments, cette hauteur est estimée à partir du  $D_{50}$  du dépôt sur site qui est le paramètre primordial de cette méthode.

### 3.2. Stations étudiées en 2022

Plusieurs appels au réseau ont été faits pour avoir un ensemble de cas d'étude où le fond du lit était non seulement très instable, mais aussi stables pour pousser à bout l'outil et analyser la performance des méthodes de segmentation. Les stations analysées cette année sont :

- Le Sonnant au pont de Venon (collaboration avec Christophe ROUSSEAU)
- La Loire à Goudet, La Dunières à Sainte-Sigolène-Vaubarlet, Le Chapeauroux à Saint-Bonnet-de-Montauroux, L'Allier à Prades (collaboration avec David BESSON et Gauthier CORDEAU de la DREAL Centre-Val de Loire)
- La Garonne à Lamagistère (Collaboration avec Michel LANG, INRAE)

Dans le présent rapport, seulement certaines stations seront présentées de façon détaillée afin de laisser une trace du travail réalisé dans le cadre de cette action.

### 3.2.1. Le Sonnant au pont de Venon

La présente station hydrométrique a été utilisée comme cas de référence pour effectuer une étude de sensibilité des paramètres de deux premières méthodes de segmentations. En d'autres termes, la segmentation à partir d'analyse des résidus entre les jaugeages et la courbe de tarage et l'analyse des récessions. Néanmoins, puisque la résolution de la chronique temporelle était très élevée et les récessions n'étaient pas très bien définies, l'étude s'est limitée à la segmentation par jaugeages.

A la fin de l'étude, deux livrables ont été rendus au gestionnaire et il y a eu deux présentations entretemps. Il s'agissait d'une discussion sur le modèle BaRatin à adopter, puis d'une présentation finale après l'étude.

#### 3.2.1.1. Information fournie par le gestionnaire

Grâce au rapport (Dut\_Sonnant\_CT\_220304) fourni par Christophe Rousseau (CR), certaine information importante a été retenue pour l'étude. Il faut remarquer qu'en premier lieu, 85 jaugeages ont été retenus pour l'analyse et ensuite 100. De même, le limnigramme traité se trouve sur la Base de Données pour les Observatoires en Hydrologie (BDOH) et il démarrait depuis le 23 mars 2012 jusqu'au 18 janvier 2022 à une résolution temporelle du quart d'heure.

**Repérage des détarages : H > 70 cm) depuis le 23/03/12**

| Date Heure       | Hauteur (cm) | Qualité |
|------------------|--------------|---------|
| 10/05/2013 04:15 | 74,8         | v       |
| 20/07/2014 16:30 | 75,3         | v       |
| 17/09/2015 11:00 | 71,0         | v       |
| 04/01/2018 09:00 | 97,5         | v       |
| 30/03/2018 19:45 | 78,2         | v       |
| 05/08/2018 18:30 | 75,2         | v       |

| Date Heure       | Hauteur (cm) | Qualité |
|------------------|--------------|---------|
| 01/02/2019 17:45 | 92,0         | v       |
| 12/06/2019 01:00 | 70,3         | v       |
| 15/06/2019 15:30 | 111,7        | v       |
| 01/12/2019 15:00 | 77,4         | v       |
| 29/12/2021 12:45 | 101,5        | v       |

Tableau 1. Dates des instants où la hauteur d'eau a dépassé 70 cm

| Début            | Fin              | Nom de la CT | Fichier jaugeages | Hmin (m) | Hmax (m) |
|------------------|------------------|--------------|-------------------|----------|----------|
| 23/03/2012       | 01/02/2019 17:45 | CT2011       | J2011.csv         | 0.19     | 0.43     |
| 01/02/2019 17:45 | 15/06/2019 15:30 | CT2019A      | J2019A.csv        | 0.17     | 0.34     |
| 15/06/2019 15:30 | 29/12/2021 12:45 | CT2019B      | J2019B.csv        | 0.17     | 0.50     |

Tableau 2. Détarages détectés par le gestionnaire de la station

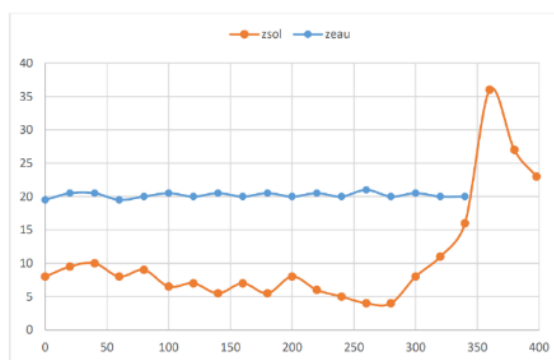


Figure 1. Section transversale de la zone d'étude

D'après le document, le 06/07/20, « la pente de la surface libre a été relevée à 1,15 %. Une mesure très approximative sur le site Geoportail sur les 50 m en amont du point de mesure (l'aval est recouvert par des arbres) amène à 2,5 %. On retiendra la valeur suivante : 1.2 % ».

Un schéma de la section transversale fait par CR est montré ci-dessous afin d'avoir une meilleure compréhension du cas d'étude.

### 3.2.1.2. Module BaRatin

Tout d'abord, BayDERS s'appuie sur la méthode BaRatin pour trouver les meilleures courbes de tarages en fonction des jaugeages et l'information a priori fournie pour chaque segment. Ci-après, il est mis en évidence le paramétrage du cas d'étude dans l'outil.

Il faut retenir que la différence entre BaRatin et BayDERS est le paramétrage du modèle. Autrement dit, BaRatin est configuré en fonction de la hauteur d'activation « k », alors que BayDERS utilise directement à l'offset « b » qui correspond souvent à l'élévation moyenne du seuil ou du lit du chenal. De même, une autre différence se trouve dans l'incertitude associée au paramètre. En effet, sur BaRatin, il faut renseigner l'incertitude élargie, alors que BayDERS prend l'incertitude-type.

**Matrice des contrôles :** deux contrôles, à bas débit l'écoulement a un contrôle par section et à fort débit, l'écoulement est seulement contrôlé par le chenal.

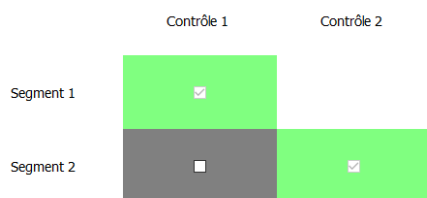


Figure 2. Matrice de contrôle

| CONTRÔLE | A PRIORI |            |                 |
|----------|----------|------------|-----------------|
|          | Variable | Valeur (m) | Incertitude (m) |
| 1        | Cr       | 0.4        | +/- 0.05        |
|          | g        | 9.81       | +/- 0.005       |
|          | Bw       | 3.5        | +/- 0.25        |
|          | b        | 0.1        | +/- 0.05        |
|          | c        | 1.5        | +/- 0.025       |
| 2        | Bc       | 3.5        | +/- 0.25        |
|          | Ks       | 25         | +/- 2.5         |
|          | So       | 0.012      | +/- 0.0025      |
|          | b        | 0.25       | +/- 0.1         |
|          | c        | 1.67       | +/- 0.025       |

Tableau 3. A priori des paramètres de chaque contrôle

### 3.2.1.3. Etude de sensibilité de la segmentation des jaugeages

Différents scénarios ont été testés afin d'évaluer l'impact du changement de certains paramètres. En ce qui concerne les variations réalisées entre les différents cas, ça pourrait être le critère de segmentation, le type d'ajustement ou la méthode d'ajustement des instants de détarage, l'incertitude relative des jaugeages, la quantité de jaugeages à évaluer et enfin, le résidu moyen.

| A priori de l'écart du mu (m³/s) | Nombre des jaugeages | Incertitude relative du jaugeage (%) | Identifiant du cas étudié | Critère | Méthode d'ajustement des instants de détarage | MAX segments | Périodes | Itérations | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Performance                                                               |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------|----------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 50                               | 85                   | 5                                    | 1                         | BIC     | CI                                            | 5            | 3        | 5          | Il semble que les deux premières périodes soient relativement cohérentes. Pourtant, la dernière n'est pas tout à fait fiable, car les jaugeages d'une même hauteur d'eau indiquent différentes valeurs du débit, ce qui n'est pas cohérent s'ils restent ailleurs des barres d'erreurs. Cela arrive notamment à bas débit.       | Mauvaise                                                                  |
|                                  |                      |                                      | 2                         |         | MAP                                           |              | 4        | 7          | Bien que le changement de la méthode d'ajustement des instants de détarage ait permis de détecter une autre période, le nombre de périodes reste encore très faible par rapport aux attentes. Cela indique qu'il a tendance à sous-estimer la quantité de détarages identifiés.                                                  | Mauvaise                                                                  |
|                                  |                      |                                      | 3                         | DIC     | CI                                            |              | 9        | 13         | Une augmentation dans le résidu moyen a permis de réduire la quantité de segments détectés. Les périodes semblent être cohérentes, sans aucune anomalie identifiée sur la segmentation. Toutefois, j'ai l'impression que sur certaines périodes, les jaugeages sont écartés, dépassant l'incertitude affectée au jeu de données. | Moyenne                                                                   |
| 100                              | 85                   | 5                                    | 4                         | BIC     | CI                                            |              | 3        | 3          | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Ce sont les mêmes résultats observés quand le résidu moyen était 50 m³/s. |
|                                  |                      |                                      | 5                         | DIC     |                                               | 14           |          | 21         | Au lieu de diminuer la quantité de segments, cela a augmenté, ce qui est une réponse du modèle à laquelle je ne m'attendais pas. Il a été encore trouvé la zone dans laquelle, apparemment, il y a plusieurs détarages consécutifs. Il semble qu'il y ait une surestimation dans le processus de segmentation.                   | Moyenne                                                                   |
| 0.03                             | 85                   | 5                                    | 6                         | DIC     | CI                                            | 5            | NA       |            | Il semble que l'outil plante quand il détecte au-delà de 19 – 20 périodes.                                                                                                                                                                                                                                                       | NA                                                                        |
|                                  |                      |                                      | 7                         | AIC     | CI                                            |              |          |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |
|                                  |                      |                                      | 8                         | HQC     | MAP                                           |              |          |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                           |

| A priori de l'écart du $\mu$ ( $m^3/s$ ) | Nombre des jaugeages | Incertitude relative du jaugeage (%)                                                                                        | Identifiant du cas étudié | Critère | Méthode d'ajustement des instants de détarage | MAX segments | Périodes | Itérations | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Performance |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------|----------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 0.03                                     | 85                   | 5 pour les jaugeages par dilution et 8 pour ceux faits par moulinet ou s'il n'y a pas d'information sur la méthode utilisée | 9                         | BIC     | CI                                            |              | 15       | 26         | Stabilité des jaugeages par période repérée. Néanmoins, il existe une zone où l'outil identifie plusieurs détarages consécutifs pratiquement les uns après les autres.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Mauvaise    |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 10                        |         | CI                                            |              | 4        | 7          | Périodes avec des jaugeages très écartés en débit, pour une même valeur de hauteur d'eau. Il y a des problèmes à bas débit pour réussir à identifier une homogénéité entre les jaugeages d'une même période. Cela veut dire que l'outil a probablement tendance à sous-estimer la quantité de segments. De plus, même si la méthode d'ajustement des instants de détarage a été changée, aucune variation importante a été remarquée.                  | Mauvaise    |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 11                        |         | MAP                                           |              | 4        | 7          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Mauvaise    |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 12                        | BIC     | CI                                            | 3            | 9        | 16         | Le changement de l'incertitude des jaugeages a montré une augmentation dans la segmentation. Ils en ont été détectés 5 en plus. Même si l'erreur trouvée précédemment pour ce critère (« sous-segmentation ») reste encore, elle a été largement atténuée.                                                                                                                                                                                             | Moyenne     |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 13                        |         | MAP                                           |              | 8        | 14         | Grosso modo, les dates de détarages identifiées sont très similaires à celles obtenues via la méthode <i>CI</i> , sauf sur deux périodes (deuxième et troisième). J'aurais tendance à dire que la segmentation proposée par la méthode en analyse est plus cohérente que celle précédente, même si les deux sont potentiellement correctes. Il faut remarquer qu'une incertitude plus large provoque une augmentation dans la détection des détarages. | Moyenne     |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 14                        | DIC     | CI                                            | 5            | 17       | 24         | En faisant l'hypothèse que l'outil plante quand il détecte plus de 19-20 périodes, il est valable d'affirmer que l'augmentation de l'incertitude sur les jaugeages a permis de détecter moins de segments. J'ai l'impression que la méthode a tendance à surestimer la quantité de détarages sur la station. De plus, il est possible de mettre en évidence encore la zone dans laquelle les détarages se concentrent.                                 | Mauvaise    |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 15                        |         | MAP                                           |              | 17       | 25         | La plupart des dates de détarages ont été conservées par rapport à l'autre méthode d'ajustement des instants de détarage. Toutefois, ce qui est intéressant est la détection d'un détarage sur un laps de temps où il n'y avait pas de mesure en continu. Ceci est possible à mon avis parce que                                                                                                                                                       | Mauvaise    |

| A priori de l'écart du $\mu$ ( $m^3/s$ ) | Nombre des jaugeages | Incertitude relative du jaugeage (%)                                                                                        | Identifiant du cas étudié | Critère | Méthode d'ajustement des instants de détarage | MAX segments | Périodes | Itérations | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Performance |
|------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------|----------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                          |                      |                                                                                                                             |                           |         |                                               |              |          |            | l'outil estime l'écart relatif entre la CT en vigueur et les jaugeages et puis il estime s'il y a eu une différence importante entre les deux pour détecter un détarage sur notre CT. C'est pour cela que même si le limnigramme ne fournit pas de série, un détarage est détectable par l'outil.                                                                                                                                                                                                                                                                            |             |
| 0.03                                     | 100                  | 5 pour les jaugeages par dilution et 8 pour ceux faits par moulinet ou s'il n'y a pas d'information sur la méthode utilisée | 16                        | BIC     | CI                                            |              | 11       | 18         | Deux périodes en plus ont été repérées par rapport à la configuration précédente (BIC-IC 85 jaugeages). Il est remarqué la pertinence d'utiliser la totalité des jaugeages disponibles, même s'il n'y a pas de limnigramme sur la période de temps. Cette segmentation ne nécessite pas d'avoir le limnigramme pour effectuer l'analyse parce qu'elle est basée seulement sur l'étude des jaugeages. C'est pourquoi l'outil détecte plusieurs détarages sur le premier laps de temps du limnigramme. Contrairement à avant, quand il n'y avait pas de détection de détarage. | Bonne       |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 17                        |         | MAP                                           |              | NA       |            | Il semble que l'outil plante quand il détecte plus de 19 – 20 périodes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | NA          |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 18                        | DIC     | CI                                            |              | 8        | 12         | L'augmentation de la quantité de données des jaugeages a fait que la méthode détecte moins de périodes. Il faut remarquer surtout la disparition de la zone dans laquelle il y avait une « sur-segmentation ». Effectivement, toutes les neuf autres périodes supplémentaires ont été réunies dans une même période. Ce problème a été résolu. Toutefois, il semblerait qu'il soit très probable d'avoir plus de détarages que ceux détectés.                                                                                                                                | Bonne       |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 19                        |         | MAP                                           |              | 8        | 12         | Aucun changement n'a été détecté entre les deux méthodes de segmentation.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Bonne       |
|                                          |                      | 10 dilution et 15 moulinet                                                                                                  | 20                        | BIC     | CI                                            |              | 5        | 8          | Certaines périodes semblent être correctes, mais il y en a d'autres qui peuvent avoir tendance à sous-estimer la quantité de détarages détectés.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Moyenne     |
|                                          |                      |                                                                                                                             | 21                        | BIC     | CI                                            |              | 8        | 14         | Un bon indicateur est la détection d'un changement de courbe fournie par le gestionnaire. Toutefois, il y en a deux que l'outil n'est pas capable d'identifier.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Bonne       |

| A priori de l'écart du mu (m³/s) | Nombre des jaugeages | Incertitude relative du jaugeage (%)                                       | Identifiant du cas étudié | Critère | Méthode d'ajustement des instants de détarage | MAX segments | Périodes | Itérations | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Performance                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------|----------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.25                             |                      | faits par moulinet ou s'il n'y a pas d'information sur la méthode utilisée |                           |         |                                               |              |          |            | Plusieurs détarages détectés dans les premières années du limnigramme, mais aucun détarage identifié dans les années plus récentes. Cela reste discutable, car l'analyse de la courbe Q(h) aurait tendance à indiquer qu'il y a encore des détarages sur cette période de temps.<br>Tendance claire des périodes détectées à l'exception du dernier. Néanmoins, il ne faut pas pénaliser la performance de l'outil si les données d'entrée ne sont pas très fiables. Effectivement, il semble qu'il existe une erreur par rapport aux jaugeages, car pour une même hauteur d'eau, il y a deux valeurs différents de débits. Cela pourrait être expliqué par l'arrondissement des chiffres au moment du jaugeage. |                                                                                                                                                                                    |
|                                  |                      |                                                                            | 22                        |         | MAP                                           |              | 7        | 12         | Identification d'un détarage qui correspond au changement de courbe de tarage rapporté par le gestionnaire de la station.<br><br>Bon taux de détection des détarages sur le début du limnigramme. La dernière période a tendance à sous-segmenter.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Moyenne                                                                                                                                                                            |
|                                  |                      |                                                                            | 23                        |         | CU(Choix utilisateur)                         |              | 6        | 10         | Identification de certains détarages les premières années, mais il est mis en évidence un manque de détection de détarages sur la dernière période notable.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Moyene                                                                                                                                                                             |
|                                  |                      |                                                                            | 24                        |         | CI                                            |              | 9        | 15         | Bon taux de détection de détarages tout au long de la période d'analyse. De plus, l'outil arrive à identifier approximativement deux périodes rapportées par le gestionnaire. Il semble que les périodes soient bien identifiées sauf la huitième qui pose un peu question, mais qui peuvent s'expliquer par l'incertitude sur les jaugeages.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Bonne                                                                                                                                                                              |
|                                  |                      |                                                                            | 25                        |         |                                               |              | 2        | 8          | 15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | La détection des détarages semble plutôt cohérente, aucune trace de zones de « sur-segmentation », la quantité de détarages identifiée semble aussi conforme aux autres résultats. |
| 0.3                              | 26                   | 3                                                                          | 14                        |         |                                               |              |          |            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                    |

| A priori de l'écart du mu (m³/s) | Nombre des jaugeages | Incertitude relative du jaugeage (%) | Identifiant du cas étudié | Critère | Méthode d'ajustement des instants de détarage | MAX segments | Périodes | Itérations | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                              | Performance |
|----------------------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------|-----------------------------------------------|--------------|----------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                  |                      |                                      |                           |         |                                               |              |          |            | Détection d'un détarage rapporté aussi par le gestionnaire, ce qui est plutôt un bon indicateur pour fiabiliser les résultats après simulation. Manque de détection de deux détarages fournis pas le gestionnaire, mais qu'il est possible de critiquer. |             |
| 0.5                              |                      |                                      | 27                        |         |                                               | 2            | 11       | 21         | Mise en évidence une zone de «sur-segmentation» au milieu de la série temporelle. Par contre, le comportement de la plupart de détarages détectés semble à celui identifié au cas précédent.                                                             | Moyenne     |
|                                  |                      |                                      | 28                        |         |                                               | 3            | 8        | 14         | Mêmes résultats nets que ceux trouvés pour le cas de 0.3 m³/s                                                                                                                                                                                            | Bonne       |
| 1                                |                      |                                      | 29                        |         |                                               | 2            | 8        | 15         |                                                                                                                                                                                                                                                          |             |
|                                  |                      |                                      | 30                        |         |                                               | 3            |          | 14         |                                                                                                                                                                                                                                                          |             |
|                                  |                      |                                      | 31                        |         |                                               | 5            |          | 14         |                                                                                                                                                                                                                                                          |             |
|                                  |                      |                                      | 32                        |         |                                               | 2            | 8        | 15         |                                                                                                                                                                                                                                                          |             |
| 2                                |                      |                                      | 33                        |         |                                               | 3            |          | 14         |                                                                                                                                                                                                                                                          |             |

*\*Les premiers tests font référence aux certains cas hypothétiques qui ne représentent pas notre cas d'étude. Ils ont été seulement utilisés pour évaluer la pertinence du résidu moyen entre les jaugeages et la CT.*

*Tableau 4. Comparatif des résultats de segmentation des jaugeages du Sonnant pour différents scénarios de paramétrage*

Après avoir analysé les 33 différents scénarios de paramétrage, il est possible de conclure que la segmentation par jaugeages est très sensible non seulement à l'incertitude affectée aux mesures, mais aussi à la quantité de jaugeages.

Effectivement, il semble que l'incertitude associée aux données des jaugeages soient un peu faible, c'est pour cela que la meilleure option était d'augmenter leur incertitude en fonction du type de jaugeages (dilution ou moulinet). D'ailleurs, il a été mis en évidence que la quantité de jaugeages a aussi un rôle important, car si l'ensemble de jaugeages augmente, l'outil améliorerait le taux de détection de détarages. De même, il y a un intérêt notable d'utiliser le BIC comme critère de segmentation puisqu'il donne une meilleure stabilité de la quantité de segments identifiés.

Parmi les méthode d'ajustement des instants de détarage (CI, MAP ou CU), il existe un intérêt particulier sur l'utilisation du CI parce que l'hypothèse de base est la plus judicieuse. En d'autres termes, cette méthode va associer un détarage à la crue la plus proche au MAP sur un intervalle de crédibilité à 95%. Le maximum a posteriori (MAP) est estimateur qui va maximiser la densité a posteriori et ensuite, identifier une date de détarage qu'il trouve comme optimale. C'est une bonne approche sauf qu'il manque la justification physique pour laquelle le détarage a été affecté à la date rapportée. Enfin, le choix de l'utilisateur (CU), l'automatisation du processus est perdue dans le sens qu'il faut que l'utilisateur interagisse avec l'outil à chaque itération pour affecter une date de détarage. De même, si l'usager est plutôt peu expert en termes de maîtrise du logiciel, il pourrait donner des valeurs qui n'ont pas assez de logique, ce qui va propager des erreurs sur toute la chaîne de calcul.

Par rapport au maximum de segments permis de détecter par l'outil, choisir une segmentation binaire ou au maximum de trois segments par itération semble plus favorable. D'une part, si la segmentation s'approche d'une segmentation binaire, le temps de calcul est réduit. D'autre part, une meilleure stabilisation sur la segmentation a été observée. Enfin, puisque la quantité de détarages est inconnue, il semble que la segmentation binaire soit plutôt une bonne astuce afin de limiter le calcul du critère de segmentation (BIC/DIC) qui, de temps en temps, peut donner de taux de segmentation très élevés, ce qui cause le problème de sur segmentation.

En conclusion, la station étudiée a tendance à avoir plus de détarages que ceux fournis par le gestionnaire. Autrement dit, il semble que la station ait eu entre 8 à 11 périodes avec courbe de tarage stable. D'ailleurs, il est démontré une alternance entre les processus d'érosion et dépôt qui provoquent des changements sur le fond du lit et par conséquent, des détarages des courbes. Les meilleurs scénarios seront étudiés plus en détail dans la suivante section.

Il faut remarquer qu'à partir d'une certaine valeur de l'a priori sur l'écart du résidu, les résultats obtenus étaient égaux, notamment pour les derniers scénarios étudiés.

### 3.2.1.4. Principaux résultats

L'intérêt de cette section est d'annoncer les configurations les plus adaptées au cas d'étude. Parmi les cas étudiés, les plus performantes sont : quand le résidu moyen s'élève à  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , les trois scénarios suivent le critère BIC, la méthode d'ajustement des instants de détarage est CI, la quantité de jaugeages évalués étaient 100 et enfin, leur incertitude relative était variable entre 5 % et 8 % avec une segmentation binaire ou maximum trois.

Après avoir analysé les différents scénarios disponibles, le cas le plus non seulement performant, mais également fondé est le troisième. En d'autres termes, quand l'a priori de l'écart-type du résidu moyen est égal à  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Effectivement, il semble qu'il ait un bon taux de segmentation (8 périodes détectées), il n'a pas de zone de « sur-segmentation » identifiée, les jaugeages permettent de bien identifier des tendances sur la courbe  $Q(h)$  et enfin, l'a priori n'est pas très faible ni non plus très large et c'est exactement l'objectif, donner une information préliminaire pas trop restrictive sur le paramètre. Autrement dit, on donne de la liberté pour que le paramètre puisse varier sur un intervalle et on ne limite pas la fonction de recherche dans le monde paramétrique. C'est pourquoi il est conseillé tout le temps d'affecter des valeurs plutôt élevées aux a priori afin de ne pas impacter négativement les a posteriori.

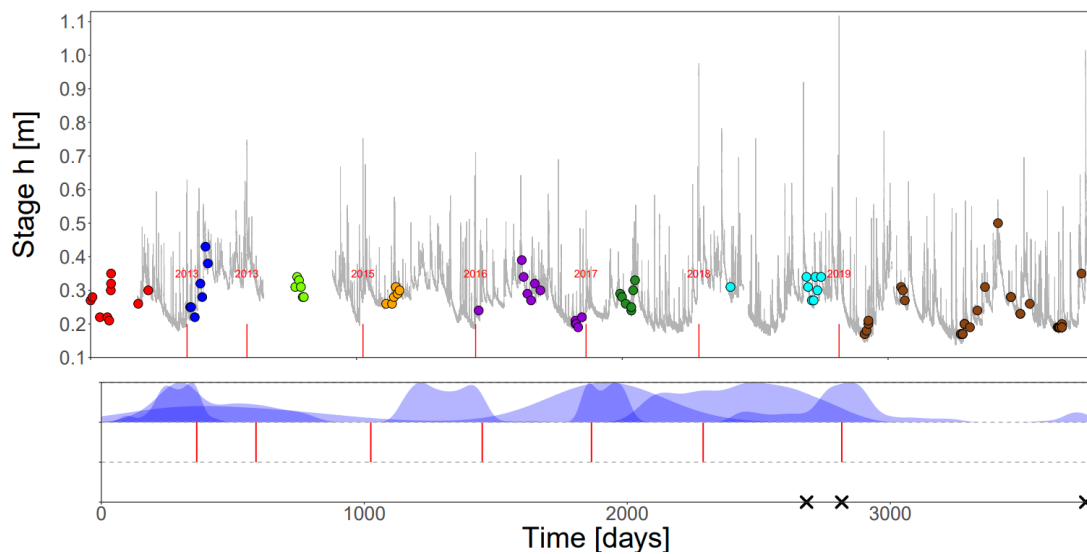


Figure 3. Limnigramme après segmentation BIC - CI, a priori sur l'écart moyen  $\mu = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  et incertitude relative variable de 5 % et 8 %

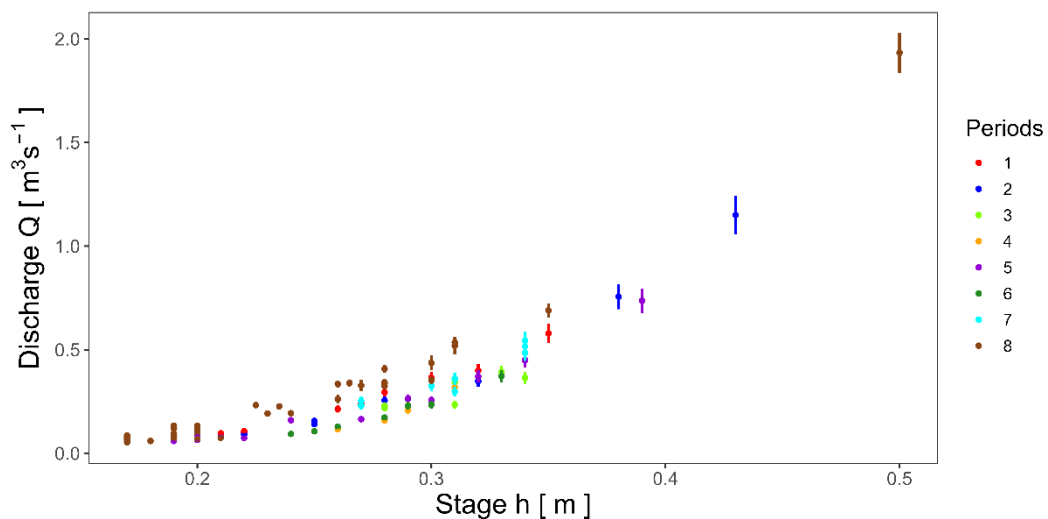


Figure 4. Jaugeages après segmentation BIC - CI, a priori sur l'écart moyen  $\mu = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  et incertitude relative variable en prenant en compte la totalité de jaugeages

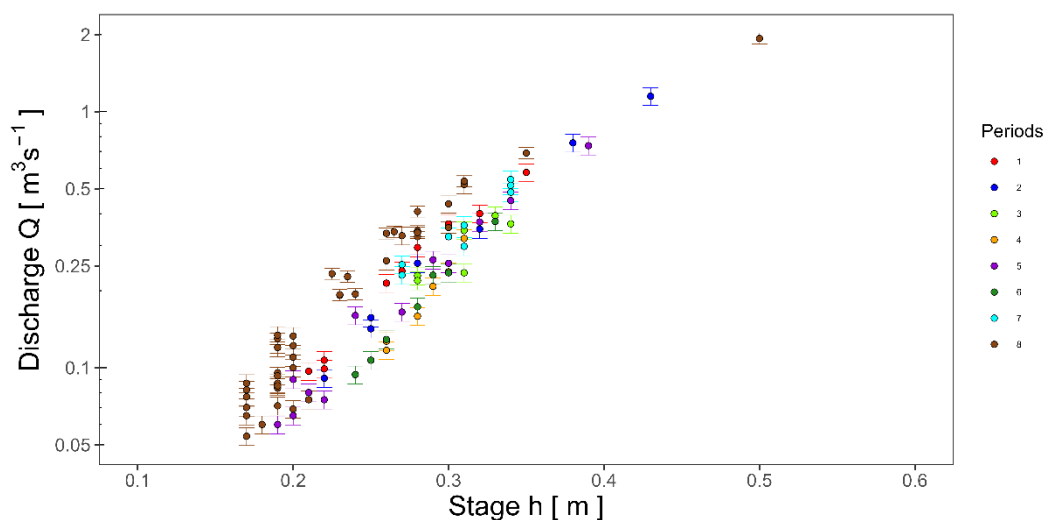


Figure 5. Jaugeages (en échelle log) après segmentation BIC – CI, a priori de l'écart du  $\mu = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  et incertitude relative variable de 5 % et 8 %

Les résultats montrent que l'outil arrive à détecter des détarages sur les premières années de mesure ce qui indique une bonne performance du paramétrage. Pourtant, il n'a pas identifié de détarage sur les années plus récentes, ce qui est plutôt discutable. En effet, d'après le gestionnaire deux détarages ont été détectés en plus sur cette période alors que l'outil détecte d'autres détarages qui ne correspondent pas aux mêmes dates rapportées. En ce qui concerne ces détarages, ils sont bien répartis tout au long de la série temporelle, en évitant des possibles zones de sursegmentation.

D'ailleurs, une remarque que je tiens à préciser est que l'outil a détecté l'un des détarages fourni par le gestionnaire de la station. Effectivement, ça peut rassurer sur la segmentation proposée si l'information fournie est très fiable. En revanche, la méthode a du mal pour identifier bien les deux autres détarages.

Si on se concentre sur l'analyse du graphique en échelle logarithmique (Figure 5), il est possible de constater une haute performance de toutes les périodes à l'exception de la huitième. Effectivement, de la première période jusqu'à la septième, il est mis en évidence une tendance marquée de la relation hauteur-débit. En revanche, la huitième période a tendance à avoir plusieurs valeurs du débit pour une même hauteur d'eau, ce qui pourrait indiquer qu'il y a eu des détarages pendant ce temps ou alors les mesures peuvent être faussées.

Pour rebondir sur la non-détection des mêmes détarages du gestionnaire, plusieurs raisons s'avèrent :

En ce qui concerne le premier détarage, une fonction de densité de probabilité s'affiche en dessous du limnigramme afin d'illustrer le comportement et la probabilité d'occurrence d'un détarage au cours de temps dans un intervalle de crédibilité.

Le détarage détecté comme « 2018 » dans la Figure 3 se montre plus en détail dans la Figure 6 ci-dessous. Ce découpage est identifié à la première itération de la méthode, il est aussi possible de remarquer que l'intervalle de crédibilité est plutôt large, ce qui fait penser que l'identification de la date du détarage n'est pas très certaine.

Etant donné qu'on a choisi d'affecter la date à la crue la plus proche au MAP, le détarage se localise à ce moment alors qu'une autre crue assez importante a eu lieu sur la date de détarage détectée par le gestionnaire, il est aussi probable que le détarage aurait pu être placé sur cette même date et par conséquent, le résultat de l'outil sera en accord avec l'information fournie par le gestionnaire, mais ce n'est pas non plus le but de l'outil parce qu'il faut éviter de s'ajuster à l'information disponible puisqu'il faut plutôt la comparer. Néanmoins, des conclusions peuvent être tirées à partir d'une analyse plus exhaustive.

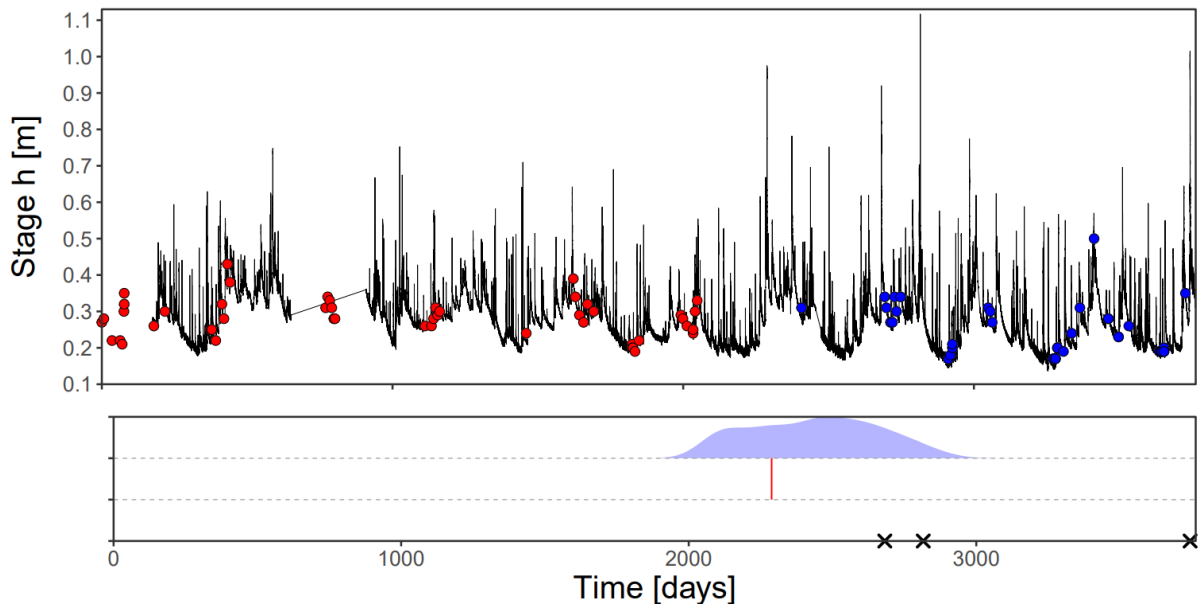


Figure 6. Segmentation des jaugeages du Sonnant, itération 1 : détection d'un détarage

Ensuite, la Figure 7 montre que même si l'intervalle de crédibilité est plutôt large, le pic de la *pdf* est plutôt court ou limité, cela veut dire que le détarage a plus de probabilité d'avoir eu lieu à cet intervalle de temps. Il faut remarquer qu'à la fin de la série temporelle, la probabilité de détarage augmente un peu ce qui indique un possible détarage, mais vu qu'il manque encore des mesures plus récentes, l'outil n'arrive pas à détecter un détarage net. C'est pourquoi BayDERS a du mal à identifier le dernier détarage rapporté par le gestionnaire. Il semble qu'il n'y ait pas assez d'information après la détection du détarage qui justifie le changement de courbe, cela peut se voir sur la Figure 8 qui montre l'étude des résidus entre les jaugeages et la courbe de tarage avec l'incertitude associée.

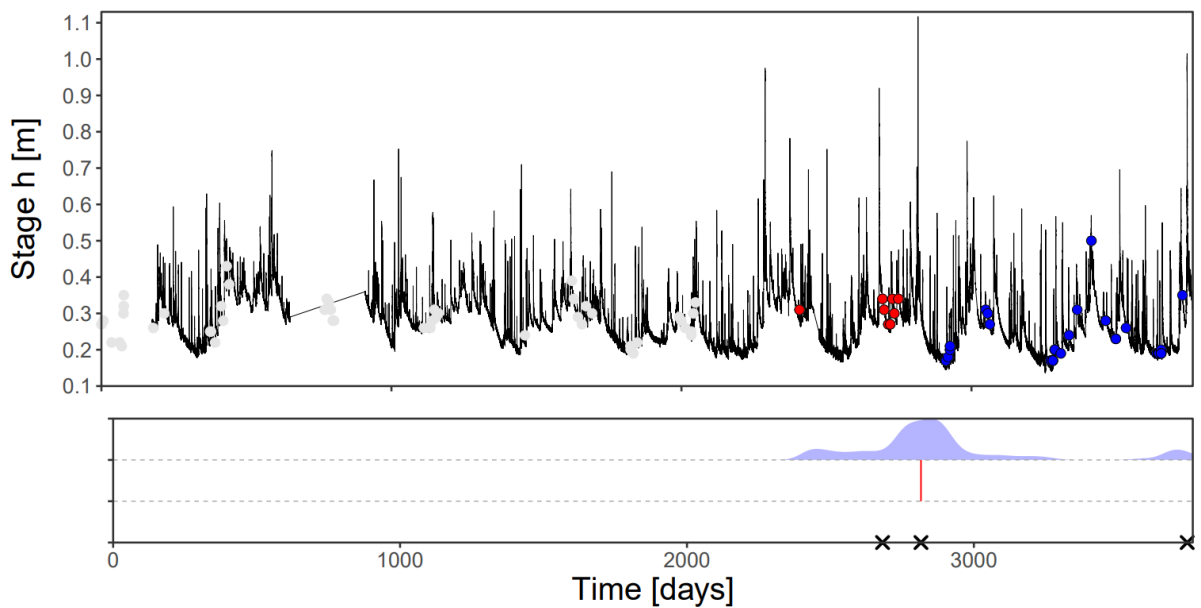


Figure 7. Segmentation des jaugeages du Sonnant, itération 12 : détection d'un détarage

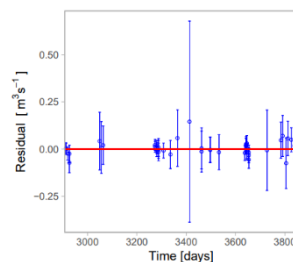


Figure 8. Etude des résidus de la dernière période (plus récente)

Enfin, 8 périodes indépendantes ont été identifiées avec la date de détarage qui indique le changement de courbe. Toutefois, un problème fréquent pour l'estimation des courbes de tarage est qu'il peut y avoir un manque de jaugeages sur certaines périodes notamment lors d'événements extrêmes à bas débit et comme à très fort débit. Afin de dépasser cette limitation, une bonne astuce à adopter est de mettre en place une étude BaRatin-SPD (*Stage-Period-Discharge*) afin d'estimer une courbe de tarage multi-période qui permettra d'utiliser l'ensemble des jaugeages sur toutes les périodes.

Pour ce faire, il faut identifier l'évolution des contrôles à travers le temps, autrement dit estimer si les changements affecteront les contrôles au niveau global, local ou les deux et ensuite, définir quels paramètres varient ( $a$ ,  $b$  ou  $c$ ). Dans ce cas d'étude, l'hypothèse réalisée est que les changements vont affecter les contrôles aux deux niveaux (local et global), mais ils vont faire varier seulement l'*offset* du premier contrôle ( $b_1$ ), car le canal est composé des parois en béton, ce qui peut nous faire penser que le paramètre  $b_2$  reste constant.

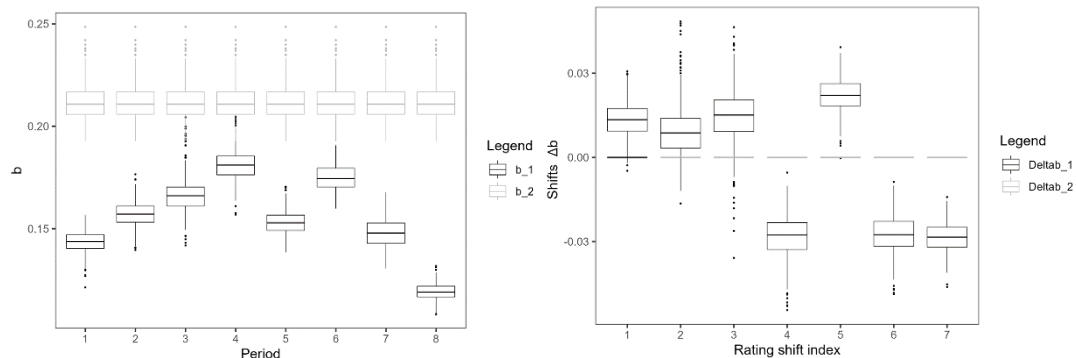


Figure 9. Estimation du paramètre  $b_1$  par période (à gauche) et calcul du delta entre deux périodes consécutives (à droite)

Les premiers résultats portent sur l'évolution du paramètre qui varie ( $b_1$ ) parmi les périodes. A gauche de la Figure 9, il est possible d'inférer les valeurs des paramètres alors qu'à droite de la figure, il s'affiche l'évolution du paramètre entre deux périodes consécutives. C'est pour cela que si la boîte à moustache est au-dessus de zéro, ça veut dire qu'il y a eu des processus du dépôt qui a fait monter la section transversale. En revanche, si la boîte se repère en dessous du zéro, des creusements ont eu lieu entretemps.

Ce comportement peut aussi se remarquer sur la Figure 10 et la Figure 11. En effet, dans la courbe  $Q(h)$ , à chaque fois qu'un processus du dépôt a eu lieu, la courbe se déplace à droite, alors que si elle se déplace à gauche, il s'agit des processus de creusement, incision ou enfoncement. La figure suivante est plus simple à remarquer parce que l'évolution du fond du lit s'affiche directement sur la série temporelle.

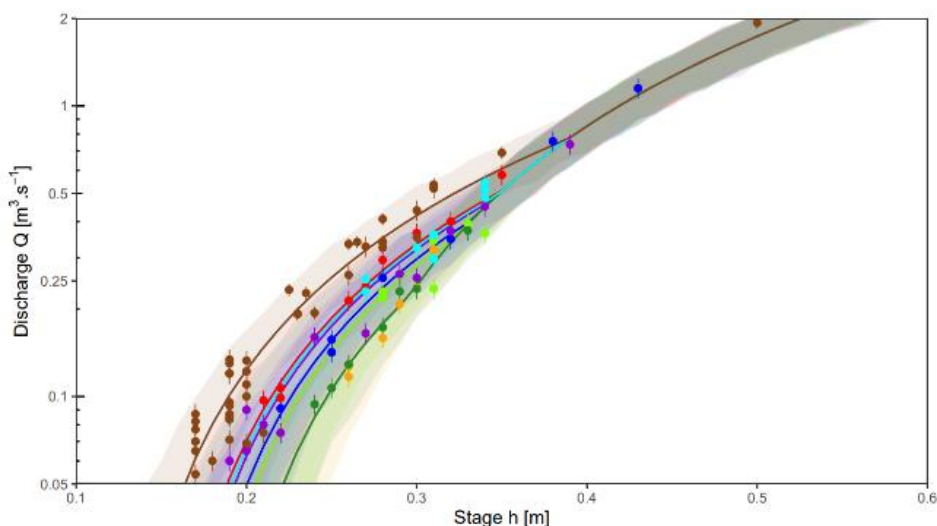


Figure 10. Courbe  $Q(h)$  multi-période issue du BaRatin-SPD

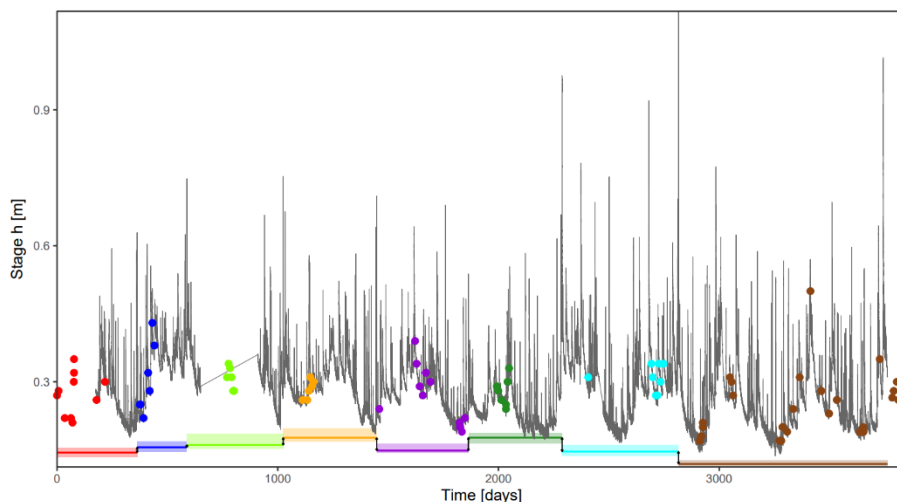


Figure 11. Evolution du fond du lit tout au long de la série temporelle

### 3.2.1.5. Conclusions principales

D'après les résultats obtenus, il est possible de tirer quelques conclusions de l'outil et du cas d'étude :

- Le BIC a donné des résultats plus stables que d'autres critères. C'est pour cela que l'accent se met sur son utilisation. Néanmoins, il faut toujours garder en mémoire que le DIC est le plus adapté dans le cadre du calage bayésien.
- Certains scénarios posent des problèmes de calcul à cause d'une zone de « sur-segmentation ».
- Mise en avant de l'importance de l'information liée aux jaugeages et leur incertitude. En effet, au fur et à mesure que l'incertitude augmentait, la performance de la segmentation augmentait. Toutefois, il faut faire attention que l'incertitude ne soit pas non plus très large parce que l'outil aura alors du mal à détecter des détarages.
- L'option de permettre à l'utilisateur de choisir la date du détarage semble intéressante. Néanmoins, il est possible de fausser les résultats à cause de l'inexpérience de l'utilisateur. C'est pour cela qu'il faudrait guider l'utilisateur pour suivre un raisonnement de sorte que les résultats soient de qualité. Sinon, l'outil pourra donner des résultats incohérents ou simplement non performants.
- La quantité potentielle de périodes identifiées par les scénarios les plus performants oscille entre 8 et 11.
- Il semble que le fond du lit soit sensible aux crues. En effet, il a tendance à bouger relativement souvent. Il y a des épisodes alternés entre dépôt et érosion.
- Un a priori très serré du résidu moyen est très difficile à justifier. C'est pour cela qu'il faut prioriser un a priori plutôt large qui semble cohérent avec le jeu de données.
- Lors d'une campagne de jaugeages d'un plan d'eau calme avec des contrôles sensibles, la précision souhaitée de sur la mesure de hauteur est de 5 millimètre (si possible) afin d'éviter des hauteurs d'eau similaires et des débits différents.
- Mise en évidence de l'utilité de BaRatin-SPD afin de bien caler les courbes de tarages sur toutes les gammes de débits.
- Détection et comparaison des détarages rapportés par le gestionnaire avec ceux identifiés par l'outil.

### 3.2.1.6. Courbes de tarage retenues

BayDERS fournit autant de courbes de tarages comme détarages détectés, mais elles sont calculées avec un jeu de jaugeages donnée. Autrement dit, aucune information est transmise d'une période à l'autre. C'est pour cela que l'approche du BaRatin-SPD se présente comme une alternative intéressante afin de mettre en valeur d'information sur d'autres périodes à celle en analyse. Afin d'illustrer l'intérêt qui porte la méthode, ce cas d'étude a été choisi comme cas d'application et les résultats se montrent ci-après. Après avoir croisé l'information avec le gestionnaire de la station hydrométrique, les résultats ont été acceptés et ensuite, une mise à jour sur Barème a été effectué.

| Nom CT          | Date début       | Date fin         |
|-----------------|------------------|------------------|
| -               | -                | 26/09/2012 19:30 |
| CT_Sonnant_2012 | 26/09/2012 19:45 | 10/05/2013 04:15 |

| Nom CT          | Date début       | Date fin         |
|-----------------|------------------|------------------|
| CT_Sonnant_2013 | 10/05/2013 04:30 | 20/07/2014 16:30 |
| CT_Sonnant_2014 | 20/07/2014 16:45 | 17/09/2015 11:00 |
| CT_Sonnant_2015 | 17/09/2015 11:15 | 05/11/2016 20:30 |
| CT_Sonnant_2016 | 05/11/2016 20:45 | 04/01/2018 10:00 |
| CT_Sonnant_2018 | 04/01/2018 10:15 | 15/06/2019 15:30 |
| CT_Sonnant_2019 | 15/06/2019 15:45 | En cours         |

Tableau 5. Courbes de tarage et leur période d'application

L'équation de la courbe de tarage de la période en cours s'affiche en détail ci-dessous :

| Modèle  | H (m)                    | Q (m³/s)                                 | CODE COULEUR |
|---------|--------------------------|------------------------------------------|--------------|
| BaRatin | 0.114406 < H <= 0.281505 | 5.102 (H - 0.114406) <sup>1.50896</sup>  |              |
|         | 0.281505 < H             | 10.4665 (H - 0.150915) <sup>1.6792</sup> |              |
| SPD     | 0.119019 < H <= 0.388991 | 5.644 (H - 0.119019) <sup>1.5204</sup>   |              |
|         | 0.388991 < H             | 13.8392 (H - 0.211989) <sup>1.6677</sup> |              |

Tableau 6. Equation des courbes de tarage de la dernière période depuis l'approche BaRatin et BaRatin-SPD

| Variables         | H (m)           | Q (m³/s) BaRatin | Q (m³/s) SPD | Ecart absolu (m³/s) | Ecart relatif (%) |
|-------------------|-----------------|------------------|--------------|---------------------|-------------------|
| <b>b1_BaRatin</b> | <b>0.114406</b> | 0.000            | -            | -                   | -                 |
| <b>b1_SPD</b>     | <b>0.119019</b> | 0.002            | 0.000        | -                   | -                 |
|                   | 0.124           | 0.005            | 0.002        | 0.003               | 61.28%            |
|                   | 0.133           | 0.012            | 0.009        | 0.004               | 31.48%            |
|                   | 0.142           | 0.023            | 0.018        | 0.004               | 19.60%            |
| <b>b2_BaRatin</b> | <b>0.150915</b> | 0.035            | 0.030        | 0.005               | 13.26%            |
|                   | 0.184           | 0.091            | 0.088        | 0.003               | 3.32%             |
| <b>b2_SPD</b>     | <b>0.211989</b> | 0.152            | 0.152        | 0.000               | -0.08%            |
|                   | 0.217           | 0.164            | 0.165        | -0.001              | -0.50%            |
|                   | 0.250           | 0.250            | 0.257        | -0.006              | -2.58%            |
| <b>K2_BaRatin</b> | <b>0.281505</b> | 0.34296          | 0.356        | -0.013              | -3.87%            |
| <b>K2_BaRatin</b> | <b>0.281505</b> | 0.34296          | 0.356        | -0.013              | -3.87%            |
|                   | 0.30            | 0.428            | 0.420        | 0.009               | 2.03%             |
|                   | 0.33            | 0.583            | 0.530        | 0.053               | 9.08%             |
|                   | 0.36            | 0.756            | 0.649        | 0.107               | 14.20%            |
| <b>K2_SPD</b>     | <b>0.388991</b> | 0.940            | 0.7709       | 0.169               | 18.00%            |
| <b>K2_SPD</b>     | <b>0.388991</b> | 0.940            | 0.7709       | 0.169               | 18.00%            |
|                   | 0.39            | 0.947            | 0.778        | 0.169               | 17.81%            |
|                   | 0.42            | 1.155            | 1.009        | 0.146               | 12.62%            |
|                   | 0.45            | 1.379            | 1.263        | 0.116               | 8.39%             |

Tableau 7. Estimation du débit à partir des équations des courbes de tarage et les écarts détectés

La grille précédente montre l'estimation du débit en fonction d'une hauteur d'eau donnée. Un découpage plus détaillé est proposé au début afin d'analyser l'évolution du débit à basses eaux. Les valeurs en gras correspondent aux variables d'intérêt (b1, b2 et K2) du modèle BaRatin et BaRatin-SPD.

L'évaluation de la hauteur de transition ou de changement du contrôle (k2) permet de mettre en évidence le principe de continuité entre les deux équations. En d'autres termes, l'estimation du débit a été faite par l'équation du premier contrôle et ensuite, par la deuxième et elle devrait être la même valeur, ce qui est le cas. Enfin, on conclut l'existence de continuité entre les contrôles hydrauliques non seulement dans le modèle BaRatin, mais aussi dans BaRatin-SPD.

Etant donné l'utilité et la nécessité de faire interagir les différentes périodes d'une chronique temporelle, une astuce à adopter est l'utilisation des résultats issus de BaRatin-SPD. C'est pour cela qu'une étude sur les résidus a été effectuée en

prenant comme référence la simulation avec BaRatin.

Un code couleur a été affecté afin de mettre en avant les résultats qui ont un écart relatif important, j'ai pris comme seuil 15 %, en dessous le code couleur est vert, alors que s'il dépasse le seuil, le code couleur est rouge.

On peut remarquer que les écarts sont plutôt élevés à très bas débit, ce qui est attendu à cause de l'ordre de grandeur des résultats des simulations. Ensuite, les résultats se rapprochent les uns des autres, puis ils s'écartent de nouveau et enfin, les résultats deviennent encore très similaire.

Même si les résultats sont similaires sur une certaine gamme de débit, il faut se rappeler que ce sont deux modèles différents. En effet, tous les paramètres ont changé en fonction du modèle en question et par conséquent, les équations ont été modifiées. De même, les hauteurs d'activation vont retarder l'activation du deuxième contrôle dans le cas de SPD.

D'après mon point de vue, j'ai l'impression que les résultats de BaRatin-SPD font interagir plus d'information indispensable pour la bonne compréhension de l'évolution du fond du lit et notamment les détarages. Effectivement, l'idée est d'estimer un modèle unique multi-période.

La principale différence entre les deux méthodes est l'estimation de la hauteur d'enneigement. Effectivement, l'approche SPD estime que K2 se repère à environ 0.39 m, alors qu'avec BaRatin, la hauteur d'activation est calculée à 0.28 m. Cela peut s'expliquer par l'hypothèse d'une courbe de tarage constante sauf le paramètre b1. Sous cette hypothèse, c'est le meilleur ajustement que BaRatin-SPD identifie. En revanche, BaRatin considère les courbes de tarage indépendantes les unes des autres en fonction de chaque jeu de jaugeages, en étant libre d'estimer tous les paramètres de la CT de façon indépendant sans prendre en compte les périodes adjacentes ou sans respecter aucune continuité intra-période.

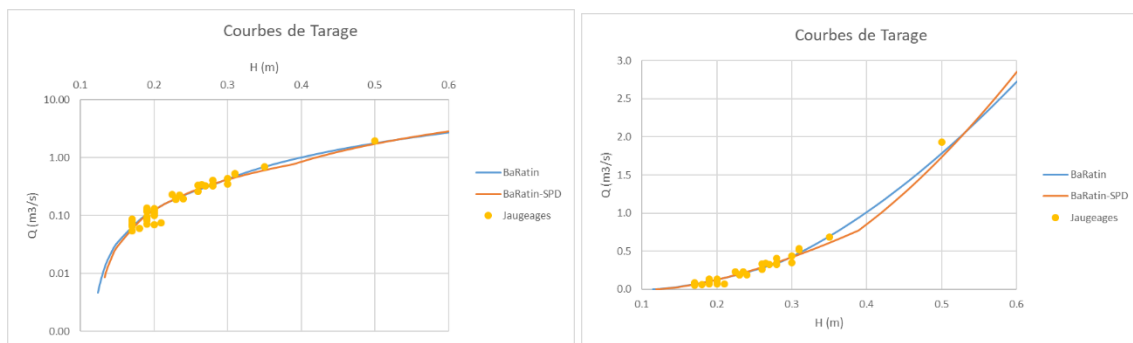


Figure 12. Le Sonnant : Courbe de tarage en cours en échelle normale (à gauche) et logarithmique (à droite)

### 3.2.2. La Loire à Goudet

C'est une station hydrométrique située au cours des premiers kilomètres de La Loire dans le département de la Haute-Loire en région Auvergne-Rhône-Alpes. Le service gestionnaire de la station est la DREAL Centre-Val de Loire qui s'occupe de réaliser des jaugeages et de maintenir à jour les courbes de tarage.

Le but d'utiliser le présent cas d'étude était à cause des gros détarages constatés et l'instabilité des contrôles hydrauliques, notamment à bas débit. De même, le transport solide sur la zone d'étude est très difficile à étudier à travers l'approche de BayDERS. Effectivement, le ruisseau de l'Holme se jette dans La Loire quelques mètres à l'aval de la position du capteur. C'est pourquoi les crues sur l'Holme peuvent générer les détarages, ce qui ne peut pas forcément se déduire du signal hydro de la Loire.

D'après David Besson, DREAL Centre, quelques détarages ne sont pas détectables parce qu'ils peuvent venir de la stabilisation progressive des alluvions (tassement et surtout végétalisation arbustive). Ce sont les raisons pour lesquelles l'approche du transport solide proposé sur BayDERS aurait des problèmes à traiter ce cas d'étude. Donc l'analyse se limite aux deux premières méthodes, notamment l'étude des écarts des résidus et des récessions. La période analysée démarre depuis janvier 2018 jusqu'à juin 2022.

BayDERS a besoin d'avoir certaine information en amont avant de lancer les différents types de segmentations. En premier lieu, il faut étudier la zone où la station hydrométrique est placée afin déterminer les contrôles hydrauliques au moment de

l'étude. Les séries temporelles du niveau d'eau sont récupérées ainsi que les jaugeages réalisés tout au long de la période d'étude. A ce stade, un modèle BaRatin peut être conçu et il faudrait paramétrer ensuite chaque type de segmentation pour la détection de détarages.

### 3.2.2.1. Analyse BaRatin

Différents modèles ont été proposés pour la représentation de la station, car il n'y a pas de modèle à disposition utilisé par le gestionnaire à cause de l'instabilité des contrôles hydrauliques. Enfin, le site peut être modélisé par deux contrôles hydrauliques, de type section à basses eaux et de type chenal à hautes eaux. Les valeurs des a priori soumises aux paramètres s'affichent ci-après :

| CONTRÔLE | A PRIORI |            |                 |
|----------|----------|------------|-----------------|
|          | Variable | Valeur (m) | Incertitude (m) |
| 1        | Cr       | 0.4        | +/- 0.05        |
|          | g        | 9.81       | +/- 0.005       |
|          | Bw       | 6          | +/- 0.75        |
|          | b        | 0.65       | +/- 0.075       |
|          | c        | 1.5        | +/- 0.025       |
| 2        | Bc       | 25         | +/- 3.0         |
|          | Ks       | 15         | +/- 2.5         |
|          | So       | 0.007      | +/- 0.0025      |
|          | b        | 1.1        | +/- 0.2         |
|          | c        | 1.67       | +/- 0.025       |

Tableau 8. A priori pour le modèle BaRatin à Goudet

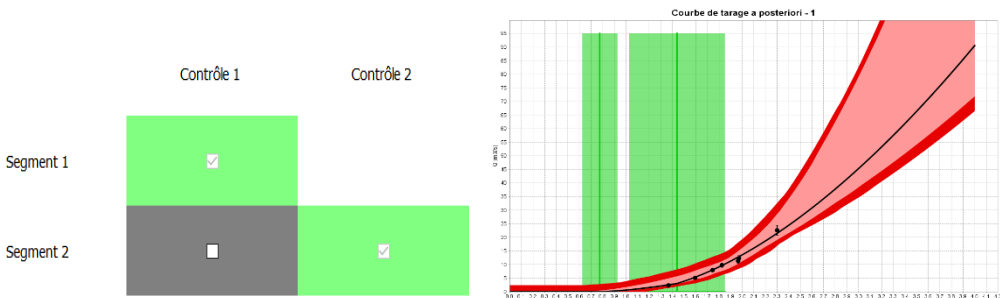


Figure 13. Matrice des contrôles et courbe de tarage a posteriori de la station de la Loire à Goudet

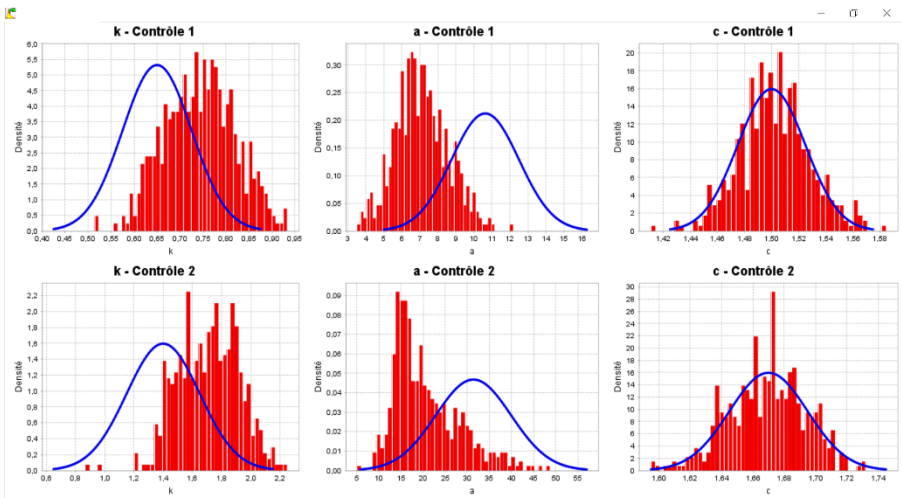


Figure 14. Distribution a priori et a posteriori des paramètres

Une première simulation s’effectue en prenant en compte la totalité de la période à étudier. Il semble que la courbe de tarage et les distributions a posteriori soient plutôt cohérentes malgré la quantité de jaugeages disponible sur la période d’étude.

### 3.2.2.2. Résultats BayDERS : segmentation des jauges

L'analyse s'effectue avec 61 jauges disponibles sur la période étudiée. D'après l'étude de sensibilité des paramètres du cas précédent, l'incertitude associée aux jauges jouait un rôle très important au niveau de la segmentation. C'est pour cela que plusieurs segmentations ont été testées à différentes valeurs d'incertitude afin de vérifier si c'était systématique ou plutôt particulier au cas d'étude du Sonnant.

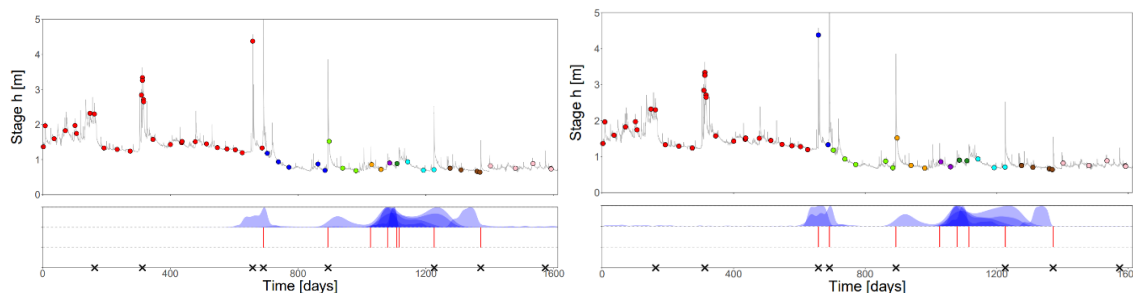


Figure 15. Loire à Goudet, segmentation par jauges : incertitude associée d'après Barème (à gauche) et constante à 10 % (à droite)

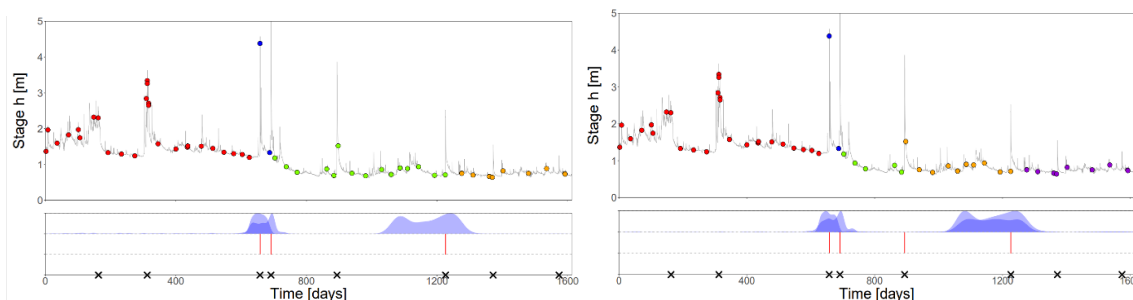


Figure 16. Loire à Goudet, segmentation par jauges : incertitude associée constante à 15 % (à gauche) et constante à 20 % (à droite)

La segmentation présentée à gauche dans la Figure 15 montre que dans le cas où l'incertitude des jauges s'obtient à partir de Barème, 9 périodes ont été détectées. Néanmoins, seulement 4 correspondent aux mêmes dates que celles rapportées par le gestionnaire. L'outil de BayDERS détecte des détarages successifs rapide sur une période de temps très court (zone de sur segmentation), de même les détarages se trouvent dehors de tout événement de crue significatif, donc douteux.

En revanche, à droite de la même figure, on présente la segmentation à partir du jeu de données affecté avec une incertitude de 10 % constante. Même si les deux configurations ont identifié la même quantité de périodes, une amélioration du découpage a été mise en évidence. D'un côté, la zone de sur-segmentation a disparu et d'un autre côté, 5 sur 8 détarages ont été détectés par l'outil et par le gestionnaire.

Afin d'évaluer l'impact de l'incertitude, deux autres cas ont été proposés avec des incertitudes de jaugeage constantes de 15 % et 20 % (cf. Figure 16). On en conclut que même si l'incertitude est de plus en plus large, ça n'indique pas forcément que l'outil détecte moins de détarages. Effectivement, quand l'incertitude est de 15 %, 4 périodes ont été détectés alors qu'à 20 % un détarage en plus a été identifié.

De même, il faut dire qu'une incertitude très large implique une perte d'efficacité sur la détection de détarages. Par contre, ceux trouvés sont aussi détectés par le gestionnaire.

Après plusieurs discussions, l'incertitude à prendre pour poursuivre l'étude de la station hydrométrique est celle à 10 % constante sur tous les jauges. Maintenant, il faut comprendre les raisons pour lesquelles l'outil a identifié des détarages non détectés par le gestionnaire et vice-versa.

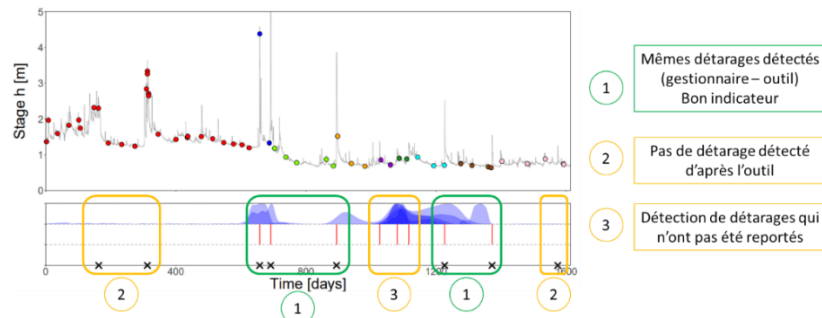


Figure 17. Remarques des résultats issus de BayDERS en comparant avec les détarages rapportés par le gestionnaire

5 détarages ont été détectés aux mêmes dates (zones 1 sur la Figure 17). Par contre, il y en a 3 qui n'ont pas été détectés par le gestionnaire (zone 3) et 3 autres qui ont au contraire été identifiés par le gestionnaire mais pas par BayDERS (zone 2).

Plusieurs explications sont possibles pour ce dernier cas :

- Manque de jaugeages
- Mauvaise estimation des incertitudes des jaugeages
- Mauvais paramétrage de BayDERS
- Mauvaise détection par le gestionnaire. C'est possible que le changement de courbe était réalisé par sécurité ou prudence.

Ensuite, une comparaison est menée entre les courbes de tarage rapportées par le gestionnaire et celles trouvées par BaRatin-SPD.

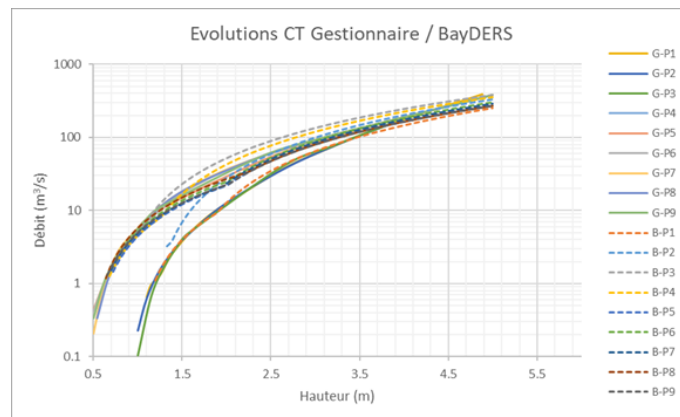


Figure 18. Comparaison de l'évolution des courbes de tarage fournies par le gestionnaire et celles obtenues via l'outil

La Figure 18 montre en ligne pointillée les courbes issues de BayDERS, alors que le reste correspond aux courbes fournies par le gestionnaire. Grosso modo, elles sont similaires à l'exception de certaines courbes, toutefois les courbes rapportées par le gestionnaire ont plus de modification de forme que celles identifiées par SPD. Quelques dates de changement de courbes ne sont pas forcément les mêmes entre les deux. A titre d'exemple, une comparaison s'effectue sur la première période détectée par BayDERS (Figure 19).

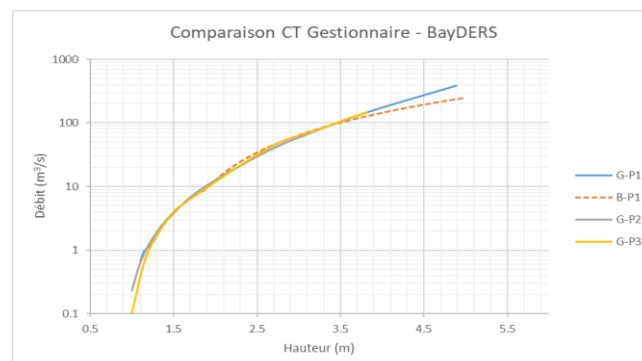


Figure 19. Loire à Goudet : comparaison des courbes de tarage gestionnaire et BayDERS sur la première période détectée par BayDERS

BayDERS n'a détecté qu'un détarage sur cette période, alors que le gestionnaire en a établi trois mais il n'y a pas de changement significatif entre les courbes. Pendant cette période, BayDERS ne détecte jamais de détarage significatif alors qu'il y a plein de jaugeages, et même en prenant les faibles incertitudes issues de BAREME. Enfin, on peut conclure que BayDERS confirme que le changement de courbe a été réalisé par sécurité.

Il est mis en évidence le potentiel et la robustesse de la segmentation (quand il y a des jaugeages) pour confirmer a posteriori qu'il n'y a pas lieu de changer de courbe. Dans ce même perspective, SPD permet de faire cette réanalyse, que les unités d'hydrométrie (UH) ne font pas toujours, alors que ça permet de réduire l'incertitude sur la courbe de tarage et d'éviter des discontinuités dans la série de débits. Néanmoins, il est conseillé que le gestionnaire devrait (a posteriori, en réanalyse) fusionner les périodes qu'il a créé en temps réel et n'utiliser qu'une seule courbe de tarage.

Après cette comparaison, il est moment de lancer l'étude BaRatin-SPD avec l'information récoltée dans le Tableau 9. Tout d'abord, une analyse des images satellite est réalisée afin d'étudier l'évolution de l'emplacement de la station pendant la période d'étude. Changements en largeur du chenal ont été observés tout au long de la période, il semble que le contrôle à bas débit soit très sensible, alors que le contrôle à fort débit est un peu plus stable, mais il varie de toute façon. C'est pour cela que l'hypothèse de base est d'affecter les changements aux deux contrôles pour ensuite étudier et analyser la stabilité de chacun.

| Modèle | Variable                                    |            | Premier contrôle |                | Type de loi |
|--------|---------------------------------------------|------------|------------------|----------------|-------------|
|        |                                             |            | Moyenne (m)      | Ecart-type (m) |             |
| SPD    | Offset (a priori BaRatin) premier contrôle  | b1         | 0.45             | 0.5            | Gaussienne  |
|        | Offset (a priori BaRatin) deuxième contrôle | b2         | 1.3              | 0.5            |             |
|        | Changement globaux                          | $\delta_b$ | 0                | 0.35           |             |
|        | Changement locaux                           | $\delta_l$ | 0                | 0.35           |             |
|        | Changement en largeur                       | $\delta_w$ | 1                | 1              |             |

Tableau 9. A priori des paramètres pour l'étude BaRatin-SPD de la Loire à Goudet

Dans le cas d'étude, il a été identifié que les changements auraient affecté l'offset b1 au niveau global et local et même la largeur du chenal. Effectivement, l'emplacement de la station est sur un secteur très instable et qui varie souvent tout au long de temps.

Enfin, l'analyse peut se lancer avec le paramétrage mentionné. Les résultats affichés ci-après correspondent d'une part aux courbes indépendantes issues de la méthode BaRatin et d'autre part à l'analyse BaRatin-SPD qui construit une courbe unique multi-période :

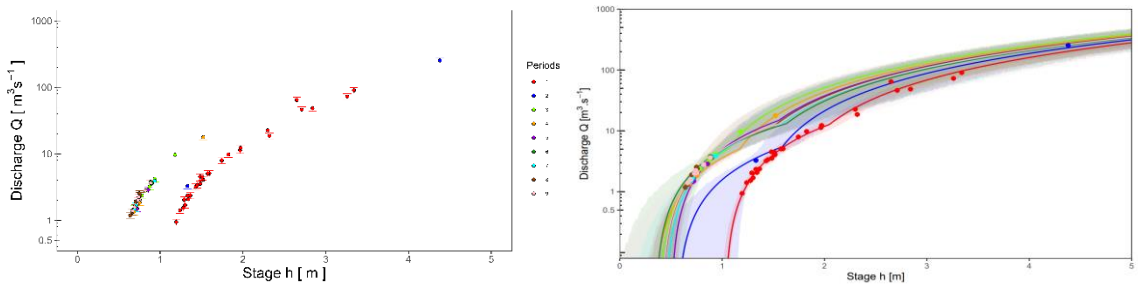


Figure 20. La Loire à Goudet : jaugeages groupé par périodes en suivant la méthode BaRatin (à gauche) et courbe de tarage multi-période issue du BaRatin-SPD (à droite)

D'un côté, après avoir mis en place la méthode BaRatin, les courbes de tarages ont été calculées d'une façon indépendante de sorte qu'elle existe seulement pour une période définie. Certaines périodes n'ont pas assez de jaugeages pour bien décrire la trajectoire de la courbe, ce qui est une limitation notamment à fort débit parce que peu jaugeages ont été réalisé à ces gammes de débits. En d'autres termes, ça peut amener des fortes incertitudes à l'extrapolation.

D'un autre côté, l'approche BaRatin-SPD permet d'intégrer toute l'information disponible afin de construire une courbe multi-période de sorte qu'elle puisse transmettre de l'information parmi les périodes identifiées, en améliorant la trajectoire de la courbe notamment dans la zone d'extrapolation.

En termes de stabilité, on observe que les offsets (b1 et b2) ont varié fortement dans les deux premières périodes et ensuite, ils deviennent de plus en plus stables. L'offset du contrôle à bas débit varie d'environ 1 m jusqu'à 0.4 m. Toutefois, le

changement se produit lors des premières périodes, ensuite el varie de l'ordre de quelques centimètres. L'offset du contrôle à fort débit (b2) varie d'environ 1.5 m dans la première période, en passant par 0.75 m pendant la troisième période, ensuite il commence à augmenter jusqu'à qu'il arrive à 1 m. Etant donné que le contrôle à bas débit est de type section, autrement dit il s'agit d'un seuil (radier graviers) et il y a un dépôt en aval de la station qui change de morphologie, le contrôle devient très sensible à cause précisément de cette variabilité. Enfin, on remarque aussi l'évolution du fond du lit. En effet, quand la courbe se déplace à gauche, cela veut dire qu'il y a eu des épisodes de creusements alors que si le déplacement est à droite, il s'agit du dépôt du matériau qui affecter le lit ou le seuil, en fonction du type de contrôle. L'outil permet aussi d'avoir une visualisation de l'évolution de l'offset du contrôle à bas débit (b1) comme la figure ci-après illustre.

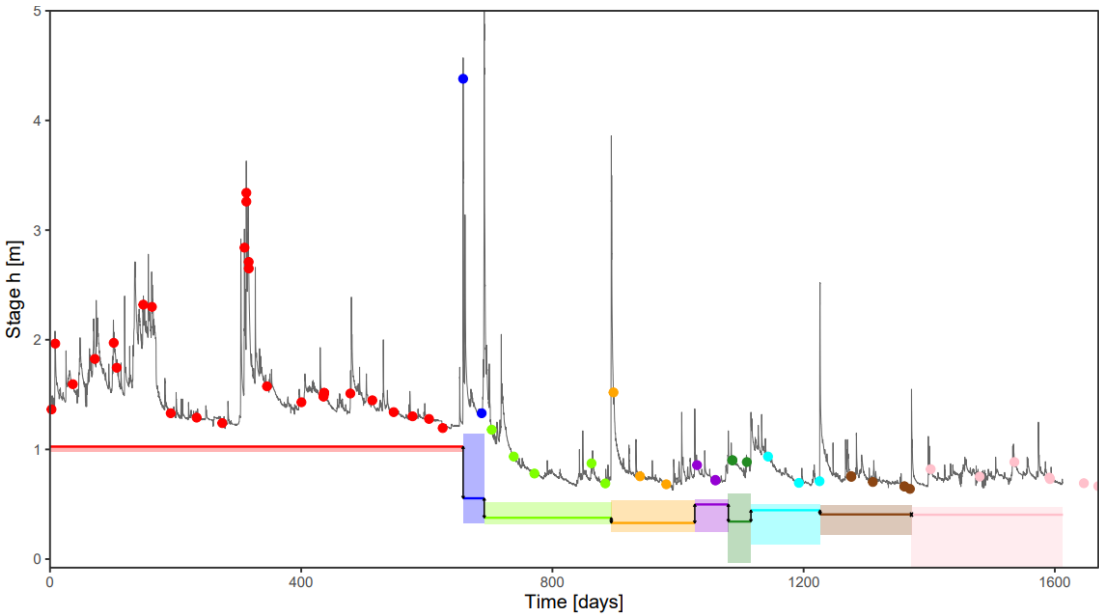


Figure 21. Evolution du paramètre « b1 » du contrôle à bas débit

### 3.2.2.3. Résultats BayDERS : segmentation des récessions

Etant donné que la station dispose d'un enregistrement continu du niveau d'eau pendant environ 4 années, il est possible de mettre en place la segmentation des récessions proposée par l'outil BayDERS. Néanmoins, avant de se mettre plus en détail sur le paramétrage, une explication des paramètres s'impose pour s'assurer de la compréhension de la méthode.

La méthode est séparée en trois étapes : la première est l'extraction des récessions dont l'outil a besoin. L'étape suivante réalise l'estimation d'une courbe de récession à partir des données extraites précédemment en fonction d'un modèle de récession choisi. Finalement, il est mis en place une étude de la hauteur asymptotique (le niveau d'eau vers lequel tendrait le limnigramme si la récession était infinie et si le débit tendait vers zéro) afin d'identifier des possibles détarages, cette étape est nommée segmentation. Contrairement à la segmentation des jaugeages, l'analyse des récessions permet aussi de quantifier les différences d'offset dues aux détarages, à partir des différences entre les hauteurs asymptotiques.

Le paramétrage de la première étape sert à réaliser un filtre afin d'avoir des récessions exploitables (Tableau 10). A terme, l'objectif est mettre par défaut certains paramètres pour aider à l'opérationnalisation de l'outil.

| Variable           | Description                                                      |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|
| uh.rec             | Ecart-type de l'erreur sur le limnigramme (cm)                   |
| tburn.rec          | Durée à ignorer en début de récession (jours)                    |
| Nmin.rec           | Nombre minimal de mesures de hauteur de la courbe de récession   |
| tgood              | Durée minimale d'une récession (jours)                           |
| $\Delta t_{min}$   | Durée minimale entre deux récessions (jours)                     |
| $\Delta t_{max}$   | Durée maximale entre deux récessions (jours)                     |
| $\chi(\text{Chi})$ | Augmentation maximale du niveau d'eau entre deux récessions (cm) |

| Variable | Description                                 |
|----------|---------------------------------------------|
| dh/dt    | Gradient maximal d'une récession (cm/jour ) |

Tableau 10. Paramètres à régler pour le lancement de la première étape lors la segmentation des récessions

Parmi les travaux à effectuer pour faire évoluer l'outil de BayDERS, ça sera de mettre en place les unités des paramètres dans le système international d'unités. Ensuite, différents modèles de courbe de récession sont proposés pour s'adapter au mieux aux données extraites (Figure 22).

Table 3.1: Stage-recession models  $h(t, k) = f(t, k | \theta_R)$  used in the paper, where  $t$  is the recession time,  $k$  is the recession index and  $\theta_R$  is the vector of model parameters.

| Stage-recession model                    |                                                                                                                             | Stable parameters                                     | Recession-specific parameters |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|
|                                          | M1. $h(t, k) = \alpha^{(k)} e^{-\lambda t} + \beta^{(k)}$                                                                   | $\lambda$                                             | $\alpha, \beta$               |
| Superposed-exponential<br>[Barnes, 1939] | M2. $h(t, k) = \alpha_1^{(k)} e^{-\lambda_1 t} + \alpha_2 e^{-\lambda_2 t} + \beta^{(k)}$                                   | $\lambda_1, \alpha_2, \lambda_2$                      | $\alpha_1, \beta$             |
|                                          | M3. $h(t, k) = \alpha_1^{(k)} e^{-\lambda_1 t} + \alpha_2^{(k)} e^{-\lambda_2 t} + \beta^{(k)}$                             | $\lambda_1, \lambda_2$                                | $\alpha_1, \alpha_2, \beta$   |
|                                          | M4. $h(t, k) = \alpha_1^{(k)} e^{-\lambda_1 t} + \alpha_2 e^{-\lambda_2 t} + \alpha_3 e^{-\lambda_3 t} + \beta^{(k)}$       | $\alpha_2, \alpha_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ | $\alpha_1, \beta$             |
|                                          | M5. $h(t, k) = \alpha_1^{(k)} e^{-\lambda_1 t} + \alpha_2^{(k)} e^{-\lambda_2 t} + \alpha_3 e^{-\lambda_3 t} + \beta^{(k)}$ | $\alpha_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$           | $\alpha_1, \alpha_2, \beta$   |
| Double-exponential<br>[Horton, 1933]     | M6. $h(t, k) = \alpha^{(k)} e^{-\lambda t^\eta} + \beta^{(k)}$                                                              | $\lambda, \eta$                                       | $\alpha, \beta$               |
|                                          | M7. $h(t, k) = \alpha^{(k)} e^{-\lambda^{(k)} t^\eta} + \beta^{(k)}$                                                        | $\eta$                                                | $\alpha, \lambda, \beta$      |
| Hyperbola<br>[Droque, 1972]              | M8. $h(t, k) = \frac{\alpha^{(k)}}{(1+\lambda t)^\eta} + \beta^{(k)}$                                                       | $\lambda, \eta$                                       | $\alpha, \beta$               |
|                                          | M9. $h(t, k) = \frac{\alpha^{(k)}}{(1+\lambda^{(k)} t)^\eta} + \beta^{(k)}$                                                 | $\eta$                                                | $\alpha, \lambda, \beta$      |

Figure 22. Modèles disponibles sur le catalogue de BayDERS pour l'estimation de la courbe de récession

Enfin, les paramètres à modifier pour la configuration de la segmentation sont donnés dans le Tableau 11.

| Paramètre                      | Description                                                                                                     |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| prior.mu.rec.segment           | A priori sur le résidu moyen pendant la segmentation (cm)                                                       |
| gamma.prior.rec                | A priori sur l'erreur restante (m)                                                                              |
| nSmax.rec                      | Nombre maximal de segments que l'outil peut détecter                                                            |
| criterion.rec                  | Critère de segmentation. DIC or BIC                                                                             |
| shift.time.adjustment.type.rec | Méthode d'ajustement des instants de détarage<br>MAP (1)<br>Flood peak (CI) (2)<br>Choix d'utilisateur (CU) (3) |

Tableau 11. Paramètres à régler pour le lancement de la dernière étape de segmentation des récessions

Après avoir compris les différents paramètres qui interviennent, il est possible de passer à leur paramétrage pour le cas d'étude (Tableau 12). Le guide écrit par Matteo Darienzo en 2021 fournit un premier aperçu pour le réglage des paramètres. Certaines valeurs ont été laissées telles qu'elles sont dans le guide mentionné.

Lors de la première étape, BayDERS a par défaut une incertitude nulle sur le limnigramme (ce qui devrait évoluer, pour affecter une incertitude à la mesure par défaut). De même, aucune information a été rapportée sur l'incertitude associée. C'est pour cela que dans ce cas d'application, l'incertitude reste la même par défaut. Le pas de temps du limnigramme est variable, mais il reste de l'ordre d'une à trois heures. C'est pourquoi il justifie d'avoir un temps de brûlage faible, puisqu'il est établi en jours.

Puis, dix mesures sont nécessaires pour retenir une récession, ce qui est d'environ un jour. Pour qu'une récession soit retenue, il faut qu'elle ait 20 jours (tgood), ce qui est un paramètre très spécifique pour chaque cas d'étude. En d'autres termes, cela dépendra du comportement du limnigramme de la station. Ce qu'il faut retenir, c'est l'hypothèse sur laquelle se base la méthode, plus les récessions sont longues, plus la récession tend vers la hauteur asymptotique.

La durée minimale entre deux récessions ( $\Delta t_{\min}$ ) n'a pas été modifiée, la valeur attribuée était celle par défaut. Alors que la durée maximale entre deux récessions ( $\Delta t_{\max}$ ) s'élève à 20 jours ce qui semble pertinent. Enfin, le paramètre chi est

l'un des paramètres le plus important, plusieurs tests ont été effectués avec différentes valeurs et celle qui a fait preuve d'avoir un bon compromis entre la quantité de récessions identifiées et leurs longueurs était 30. Le paramètre du gradient n'a pas été étudié dans ce cas parce que ce sont des dernières avancées de la méthode qui sont encore en cours de développement.

D'un côté, la période d'étude est plutôt courte (pour des questions de simplicité et temps de calcul) et d'un autre côté, les récessions n'ont pas très claires autrement dit des petites crues passent souvent par la station de mesure. Enfin, peu des récessions ont été récupérées.

D'après la thèse de Matteo Darienzo, parmi les modèles de récession le modèle à double exponentielle avec asymptote était l'un des meilleurs. Toutefois, ça pourrait être intéressant d'utiliser une simple exponentielle parce qu'il y a moins de paramètre à estimer, ce qui entraîne un gain en temps de calcul.

La dernière étape est la segmentation via l'étude de la hauteur asymptotique. Pour ce faire, il faut définir des a priori sur le résidu moyen et l'erreur restant. Comme ce sont des valeurs difficiles à estimer, il est préférable de rester avec un a priori large et d'utiliser une distribution uniforme. Les limites de la distribution pour l'estimation du résidu moyen correspondent à l'intervalle de valeurs dans lequel on trouve la hauteur asymptotique. On établit à 10 segments comme la quantité maximale qui la méthode peut segmenter, ce qui est cohérent d'après les détarages identifiés par le questionnaire et la méthode précédent.

| Paramètre        | Valeur | Modèle de récession | M2 : Double exponentielle avec asymptote |
|------------------|--------|---------------------|------------------------------------------|
| uh.rec           | 0      |                     |                                          |
| tburn.rec        | 0.1    |                     |                                          |
| Nmin.rec         | 10     |                     |                                          |
| tgood            | 20     |                     |                                          |
| $\Delta t_{min}$ | 0      |                     |                                          |
| $\Delta t_{max}$ | 20     |                     |                                          |
| $\chi$ (Chi)     | 30     |                     |                                          |
| dh/dt            | -100   |                     |                                          |

| Paramètre                      | Valeur                |
|--------------------------------|-----------------------|
| prior.mu.rec.segment           | Uniforme (-100,100,0) |
| gamma.prior.rec                | Uniforme (0,10,1)     |
| nSmax.rec                      | 10                    |
| criterion.rec                  | BIC                   |
| shift.time.adjustment.type.rec | Flood peak (CI)(2)    |

Tableau 12. Paramétrage des différentes étapes de la segmentation par récession

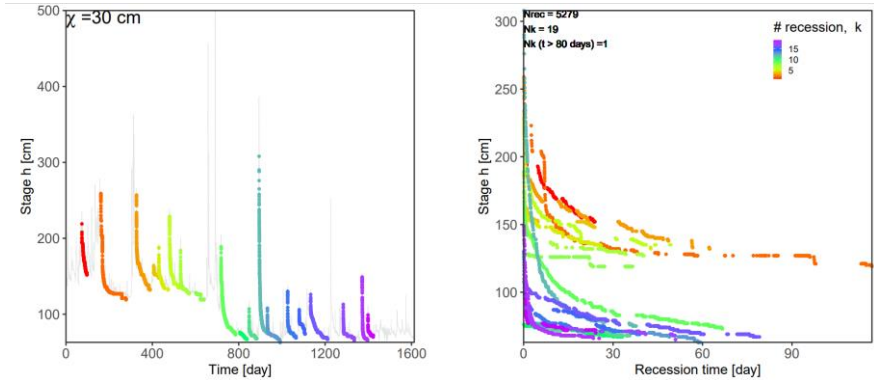


Figure 23. Loire à Goudet, période 01/2018 – 06/2022 : résultats de l'extraction des récessions

Dans la Figure 23, l'outil détecte toutes les récessions pendant la période du janvier 2018 jusqu'à juin 2022 qui respectent les paramètres indiqués précédemment. En d'autres termes, celles qui ont une longueur minimale, qui n'ont pas de trous importants dans la chronique et qui dépassent entièrement le seuil ( $\chi$  ou chi) de 30 cm. Ensuite, l'outil extrait les hauteurs les plus faibles de chaque récession afin d'avoir une aperçu de l'évolution de la hauteur asymptotique en ordre chronologique comme la figure ci-dessous illustre :

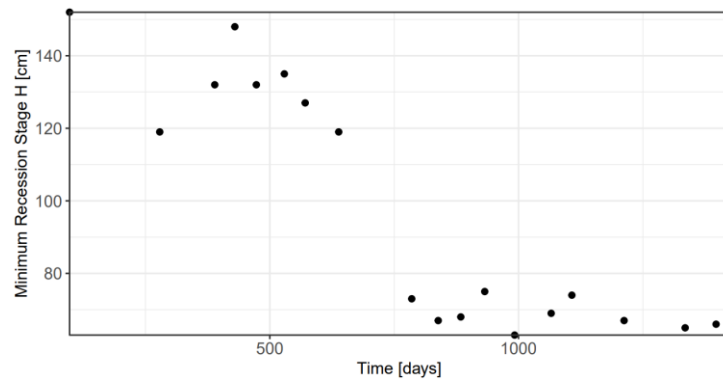


Figure 24. Loire à Goudet, période 01/2018 – 06/2022 : niveaux d'eau minimum enregistrés par chaque récession

Enfin, l'analyse des niveaux asymptotiques s'effectue afin d'identifier la présence de détarages entre les différentes récessions. Le détarage est associé à la crue la plus proche au MAP pour établir la date de changement de la période stable.

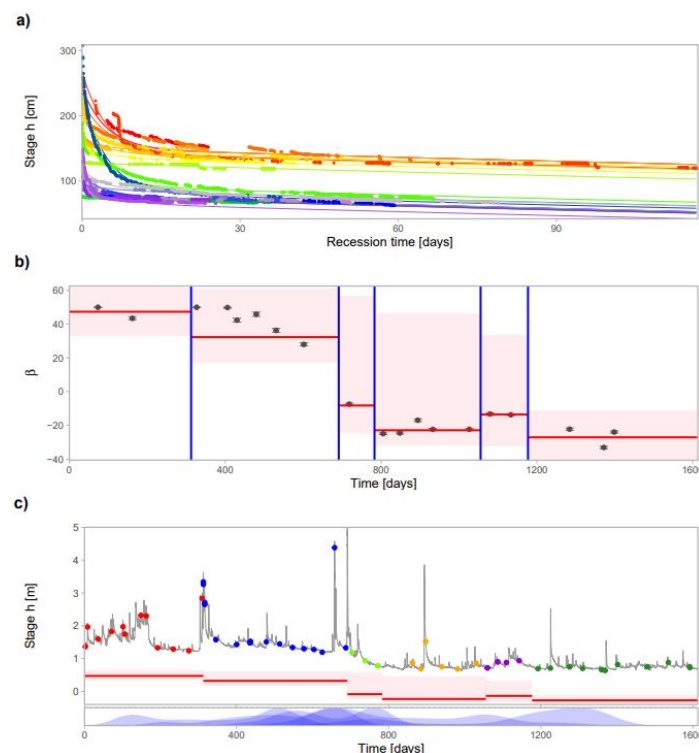


Figure 25. Loire à Goudet, période 01/2018 – 06/2022 : segmentation et évolution du fond du lit à partir de la méthode de segmentation par récession

Certaines densités de probabilité ont été identifiées comme étant trop plates, ce qui implique une grande incertitude quant au moment exact du détarage. Par conséquent, la méthode devrait être optimisée pour effectuer un filtre afin que ces distributions ne soient pas retenues. Alternativement, il est également possible d'améliorer la détection en croissant directement avec les résultats obtenus avec le type de segmentation par jaugeages. Enfin, une autre option qui peut empêcher l'apparition des fonctions de densités très étendues est de rendre le processus récursif ainsi que la segmentation par jaugeages.

### 3.2.2.4. Résultats BayDERS : étape finale

Après avoir pris en compte les deux résultats des segmentations, la dernière étape porte sur la critique des détarages obtenus par les différentes méthodes pour ensuite établir et affecter les dates de changement de la courbe de tarage.

Dans la Figure 26, le limnigramme se présente avec un code couleur associé à chaque jaugeage après avoir critiqué les détarages. Ensuite, les pdf des segmentations par jaugeages et par récession s'illustrent et les traits verticaux font référence aux dates de détarages associées à chaque analyse.

Le dernier résultat correspond à la sélection finale des dates de détarages après avoir soumis à critique l'information obtenue à partir des deux méthodes mentionnées précédemment. Ceci sera le résultat définitif de BayDERS en ce qui concerne la détection de détarages effectifs.

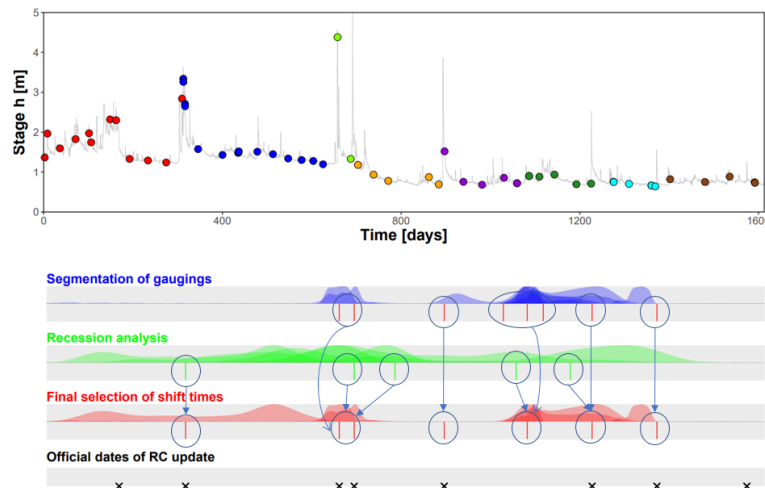


Figure 26. Loire à Goudet, période 01/2018 – 06/2022 : critique et affectation des dates de détarages

Pour aller plus loin, il faut critiquer tous les détarages identifiés par les deux méthodes, car ce sont des informations à valoriser et bien comprendre si elle est fiable ou plutôt douteuse. De même, si le gestionnaire de la station dispose d'information sur les dates de changement de courbe, il est très conseillé de la mettre en valeur afin de non seulement comparer les résultats obtenus, mais aussi de critiquer les choix des dates de détarage.

Aucune des méthodes n'a été capable d'identifier le premier détarage identifié par le gestionnaire. Ce qui est plutôt cohérent avec les résultats SPD obtenus. En revanche, le deuxième détarage a été aperçu par l'analyse des récessions. Toutefois, la fonction de densité de probabilité a tendance à être trop plate, ce qui peut mener à des erreurs d'interprétation des résultats.

Par la suite, il semble que cette dernière analyse ait du mal à identifier les dates de détarage, car plusieurs crues ont été enregistrées séquentiellement, ce qui peut perturber l'analyse. En effet, cela peut s'expliquer à nouveau par les densités très larges de la segmentation par récession. Etant donné la grande incertitude associée aux résultats, il est possible de penser qu'il y a un problème lors le paramétrage. Il convient d'examiner si une valeur non nulle doit être défini par défaut pour l'incertitude du limnigramme pour vérifier si cela peut en être la cause. D'ailleurs, dans l'état actuel des résultats par récession, il ne faut pas estimer de dates de détarage avec, mais plutôt la détection sert à croiser avec les résultats par jaugeages qui donnent des dates plus précises.

Après, un autre détarage est identifié seulement par l'étude de résidus entre les jaugeages et la courbe de tarage, et il correspond bien au détarage détecté par le gestionnaire.

Certaines zones de sur segmentation ont été identifiées lors de la segmentation par jaugeages. Elle était plus récurrente si l'incertitude associé aux jaugeages était faible. C'est pour cela qu'il existe une énorme importance d'identifier bien les source d'incertitude en amont pour la meilleure approximation. Dans ce cas-là, multiple détarages ont été détectés sur une période spécifique. L'idéal est de pouvoir croiser l'information obtenue avec la segmentation via l'analyse de récession, mais à ce stade, il semble que les conclusions de la méthode, à cause de son paramétrage, ne permettent pas de tirer des résultats concrets, mais elle sert à confirmer la présence de détarages potentiels. La sélection finale est encore à optimiser afin d'avoir des critères de sélection ou rejet de la détection d'un ou plusieurs détarage.

Enfin, l'avant dernier détarage a été bien identifié par la segmentation par jaugeages alors que la segmentation par récession est plutôt décalée, ce qui montre encore un manque de précision sur la méthode pour la bonne identification de la date de changement de la courbe. Alors que le dernier détarage détecté par le gestionnaire n'a pas pu être identifié par aucune des méthodes. Cela peut s'expliquer à cause du manque d'information nécessaire (jaugeages ou récessions) pour sa détection.

### 3.2.2.5. Conclusion principales

- La méthode identifie précisément 5 détarages assez clairs détectés par le gestionnaire.
- Deux changements de courbe par le gestionnaire en début de période correspondent à des détarages insignifiants, après calcul des courbes de tarage successives. La segmentation des jaugeages n'en détecte aucun, ce qui est normal, mais la segmentation des récessions détecte le deuxième, ce qui est douteux (forte incertitude sur le timing car la fonction de densité de probabilité est très large).
- Un détarage peut-être manqué par le gestionnaire, détecté par les deux méthodes.
- Un détarage enfin de période non détecté, la méthode a encore besoin de données après détarage. A ce stade, c'est encore très tôt, mais ça serait plutôt détectable plus tard.

### 3.2.3. La Garonne à Lamagistère

Ce cas test a été utilisé dans le cadre d'une étude menée par Michel LANG sur l'évaluation du débit de crue millénal sur la Garonne à Lamagistère pour la Division Technique Générale (DTG) d'Electricité de France (EDF). L'analyse cherche à vérifier les détarages ayant pu survenir sur une longue période de temps, pour s'assurer de l'homogénéité des relevés de débit en vue d'une analyse fréquentielle des crues.

#### 3.2.3.1. Module BaRatin

D'après le rapport, la station hydrométrique se repère en rive droite de la Garonne à 700 m en aval de la centrale de Golfech et 1 km en amont du pont de Lamagistère. En ce qui concerne le modèle BaRatin à mettre en place pour l'étude, deux contrôles hydrauliques successifs ont été proposés, les contrôles du lit mineur et lit majeur sont de type chenal. Les détails se trouvent dans le rapport rendu à EDF.

| CONTRÔLE | A PRIORI |            |                |
|----------|----------|------------|----------------|
|          | Variable | Valeur (m) | Incetitude (m) |
| 1        | Bc       | 145        | +/- 5          |
|          | Ks       | 30         | +/- 2.5        |
|          | So       | 0.0006     | +/- 0.0001     |
|          | b        | 0          | +/- 0.5        |
|          | c        | 1.67       | +/- 0.025      |
| 2        | Bc       | 2100       | +/- 250        |
|          | Ks       | 15         | +/- 2.5        |
|          | So       | 0.0007     | +/- 0.0001     |
|          | b        | 11.3       | +/- 0.5        |
|          | c        | 1.67       | +/- 0.025      |

Tableau 13. A priori des paramètres du cas de Lamagistère

Le calcul BaRatin a été effectué en utilisant l'ensemble des jaugeages de la période 1989-2022 (164 jaugeages disponibles). Dans le cadre de l'application de BayDERS, notamment la procédure de segmentation par les résidus des jaugeages à la courbe de tarage, l'incertitude associée s'élève à 10 % sur la totalité des jaugeages.

#### 3.2.3.2. Résultats BayDERS : segmentation par jaugeages

L'étude est scindée en deux parties, la première se focalise sur l'approche BaRatin pour définir le  $CT_0$  (première courbe de tarage) dans la segmentation des jaugeages. La deuxième se concentre notamment sur la création d'une courbe multi-période via SPD.

- Segmentation par jaugeages,  $CT_0$  défini via BaRatin :

| Paramètre                                                        | Valeur      |
|------------------------------------------------------------------|-------------|
| Résidu moyen a priori ( $\mu$ ) (m <sup>3</sup> /s)              | 0           |
| Ecart-type des résidus a priori ( $\sigma$ ) (m <sup>3</sup> /s) | 20          |
| Maximum de segments détectables (nSmax)                          | 2 (binaire) |
| Critère de segmentation                                          | BIC         |

| Paramètre                                     | Valeur |
|-----------------------------------------------|--------|
| Méthode d'ajustement des instants de détarage | CI     |

Tableau 14. Paramétrage de la segmentation par jaugeages à Lamagistère

L'étude conduit à un découpage de la période 1982-2022 en 9 sous-périodes homogène par la méthode de segmentation des résidu des jaugeages à la courbe de tarage (cf. Figure 27). A première vue, il n'est pas facile de détecter des détarages sur la chronique temporelle puisque les données se trouvent très proches les unes des autres. Mais la méthode de segmentation arrive à distinguer et séparer des périodes stables en fonction de l'étude des résidus.

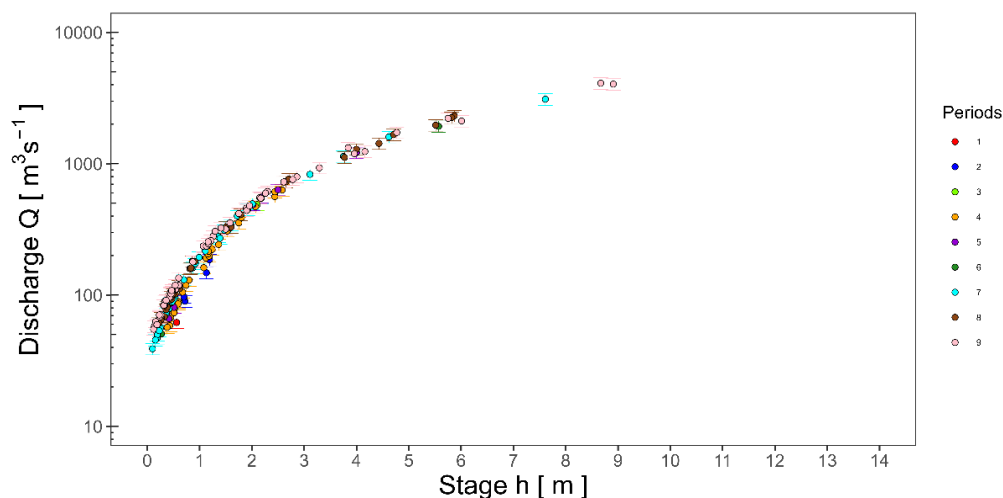


Figure 27. La Garonne à Lamagistère, période 1982-2022 : jaugeages en échelle logarithmique avec les sous-périodes détectées

D'après le gestionnaire, 9 détarages et non 8 ont été identifiés tout au long de la période analysée (cf. Figure 28). Six détarages ont été détectés au même endroit par le gestionnaire et par l'outil, alors que certains autres n'ont pas été détectés ou ne sont pas placés à la même date.

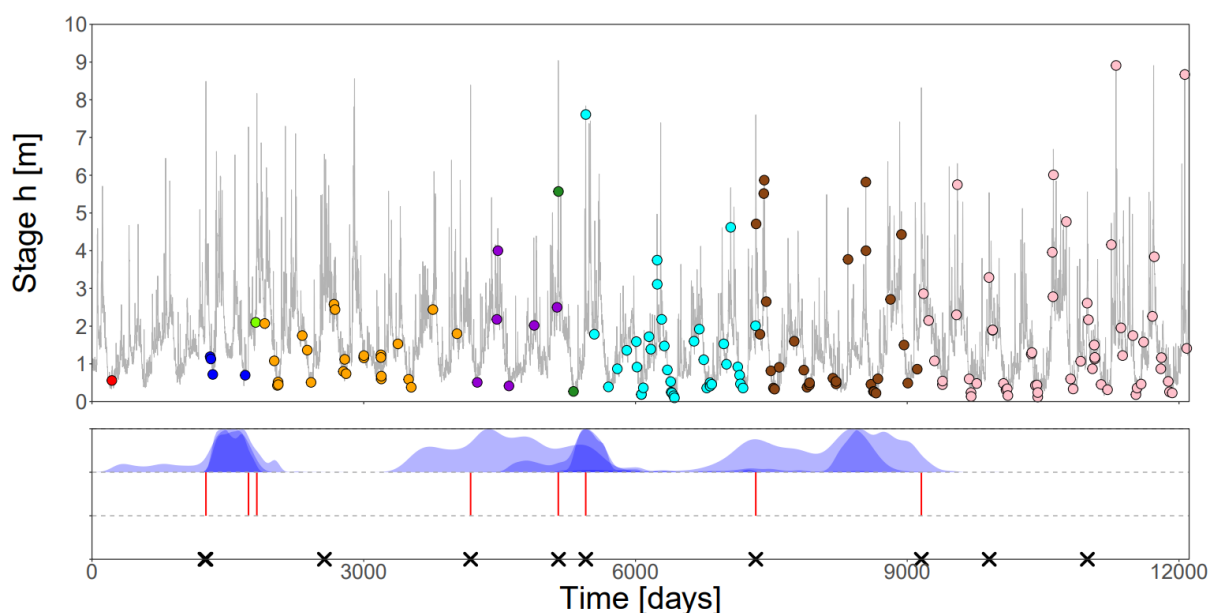


Figure 28. La Garonne à Lamagistère, période 1982-2022 : segmentation des jaugeages

- **Approche BaRatin-SPD :**

Avant de lancer BaRatin-SPD, il faut avoir lancé préalablement la segmentation par jaugeages de BayDERS. Une fois que le modèle le plus adapté a été choisi, il est possible de passer au réglage du fichier de configuration pour lancer BaRatin SPD. Le tableau ci-après résume les valeurs a priori fournies à chaque variable.

| Modèle | Variable                                |   | Premier contrôle |                | Deuxième contrôle |                | Type de loi |
|--------|-----------------------------------------|---|------------------|----------------|-------------------|----------------|-------------|
|        |                                         |   | Moyenne (m)      | Ecart-type (m) | Moyenne (m)       | Ecart-type (m) |             |
| SPD    | Offset (a priori BaRatin) (test Michel) | b | 0                | 0.5            | 11.3              | 0.5            | Gaussienne  |
|        | Offset (dernière période) (test Felipe) | b | -0.546           | 0.02           | 11.108            | 0.5            |             |

Tableau 15. La Garonne à Lamagistère, période 1982-2022 : a priori de chaque variable pour l'étude SPD

L'objectif de BaRatin SPD est d'estimer un modèle unique multi-période afin de valoriser l'information des jaugeages sur certaines gammes de débit peu jaugées. Pour ce faire, il faut identifier d'une part, quels sont paramètres qui vont varier à travers les périodes pour que l'outil puisse les recalculer et d'autre part, le type de changements (globaux, locaux ou au niveau de la largeur du chenal).

Dans le cas présent, on a défini que les changements étaient de type globaux ( $\delta_g$ ) qui vont affecter la totalité du chenal avec un a priori établi à  $0 \text{ m} \pm 0.25 \text{ m}$ . D'ailleurs, il n'y a qu'un paramètre qui peut varier parmi les périodes, celui-ci correspond au contrôle à bas débit (b1).

Il faut remarquer qu'au fur et à mesure qu'on réalisait l'étude, quelques questionnements et remarques s'avéraient par rapport à la stabilité de la méthode. Effectivement, la première discussion porte sur la différence entre les résultats de l'a posteriori et l'a priori du paramètre « b » du deuxième contrôle, même si le paramètre restait constant. La deuxième remarque s'agissait sur la répétabilité des résultats du BaRatin-SPD, car il semble que les résultats soient différents même si les données d'entrée ne changent pas. Les deux questionnements seront présentés plus en détail ci-après.

#### ○ A posteriori de la CT SPD du b à hautes eaux :

Etant donné que l'étude porte sur l'étude du débit de crue millénal, les gammes de débits à évaluer pouvaient arriver à des événements jamais jaugés. C'est pour cela qu'une absence de jaugeages à très hautes eaux semble cohérente. De même, puisqu'il n'y a pas d'information à ces gammes de débit, on pourrait penser que l'estimation de l'a posteriori du contrôle à haut débit ne change pas. Pourtant, une différence a été mise en évidence.

Afin d'évaluer de façon plus approfondie, la première approche adoptée a été de varier l'écart-type fourni en a priori et de laisser les autres paramètres constants afin de mettre en évidence si le MAP tombait sur la valeur donnée comme a priori (comportement attendu).

|                                       |       |       |      |       |      |
|---------------------------------------|-------|-------|------|-------|------|
| $\mu_{prior}$ (moyenne) (m)           | 11.3  |       |      |       |      |
| Nombre de cycles (Ncycles)            | 100   |       |      |       |      |
| $\sigma_{prior}$ (écart-type) (m)     | 0.25  | 0.375 | 0.4  | 0.45  | 0.5  |
| ID itération                          | V1c   | V2c   | V3c  | V4c   | V5c  |
| MAP distribution a posteriori (m)     | 11.35 | 11.23 | 11.5 | 11.53 | 11.1 |
| $\sigma_{posterior}$ (écart-type) (m) | 0.25  | 0.38  | 0.41 | 0.46  | 0.49 |

Tableau 16. A priori et a posteriori de b2 pour un nombre de cycles égal à 100

A première vue, il est possible de remarquer que l'a posteriori de l'écart-type reste le même par rapport à celui a priori. Par contre, le MAP varie en fonction de l'écart-type affecté.

Apparemment, les valeurs ne varient pas beaucoup entre l'a priori et l'a posteriori, mais le problème est lié aux gammes de hauteurs/débits où on travaille. En d'autres termes, la courbe de tarage a posteriori est très sensible en extrapolation au choix de l'a priori sur l'incertitude de la hauteur d'activation. Toutefois, il faut se rappeler que l'incertitude de la CT est très forte dans cette gamme de hauts débits.

Il est possible de comparer les résultats issus de BaRatin SPD avec une étude hydraulique réalisée pour des inondations. En effet, il y avait eu une modélisation sur Telemac 2D pour un événement extrême. Les résultats obtenus de cette étude concluent qu'à une hauteur de 13.58 m, le débit associé était  $12985 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Avec cette information, il est possible de faire la comparaison et calculer le résidu pour mieux comprendre les écarts à l'extrapolation (Tableau 17).

|                                |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Q(H=13,58 m) (m³/s)</b>     | 11940 | 11896 | 11121 | 11419 | 12892 |
| <b><math>\Delta Q/Q</math></b> | -8%   | -8%   | -14%  | -12%  | -1%   |

Tableau 17. Débit calculés d'après BaRatin SPD (Ncycles = 100) pour une hauteur de 13.58 et comparaison avec Telemac 2D

Il est conclu qu'il y a un écart relatif parmi les simulations à la valeur modélisée qui n'est pas très élevée, en prenant en compte le type d'évènement (crue millénal). Afin d'évaluer l'influence du nombre de cycles sur la méthode MCMC, la quantité passe de 100 à 500 itérations. Ce qui fait un ensemble de  $500 \times 100 = 50000$  simulations et le tableau suivant montre les résultats obtenus :

|                                                         |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b><math>\mu_{prior}</math> (moyenne) (m)</b>           | 11.3  |       |       |       |       |
| <b>Nombre de cycles (Ncycles)</b>                       | 500   |       |       |       |       |
| <b><math>\sigma_{prior}</math> (écart-type) (m)</b>     | 0.25  | 0.375 | 0.4   | 0.45  | 0.5   |
| <b>ID itération</b>                                     | V1    | V2    | V3    | V4    | V5    |
| <b>MAP distribution a posteriori (m)</b>                | 11.21 | 11.04 | 11.18 | 11.05 | 11.58 |
| <b><math>\sigma_{posterior}</math> (écart-type) (m)</b> | 0.25  | 0.38  | 0.41  | 0.44  | 0.50  |

Tableau 18. A priori et a posteriori de b2 pour un nombre de cycles égal à 500

|                                |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Q(H=13,58 m) (m³/s)</b>     | 11298 | 11800 | 11808 | 12628 | 10728 |
| <b><math>\Delta Q/Q</math></b> | -13%  | -9%   | -9%   | -3%   | -17%  |

Tableau 19. Débit calculés d'après BaRatin SPD (Ncycles = 500) pour une hauteur de 13.58 et comparaison avec Telemac 2D

Pareil que le cas précédent, l'a priori et l'a posteriori de l'écart-type reste constant, mais une dispersion plus importante a été identifiée sur le MAP. A priori, on pensait que si on fournit plus des simulations, l'outil avait la possibilité de mieux détecter la distribution optimale à partir des observations, mais les écarts en débit sont plus élevés qu'avant. Ça montre qu'il ne s'agit pas d'un problème numérique, mais plutôt la conséquence naturelle de l'incertitude sur la courbe de tarage.

Maintenant on s'intéresse à faire varier le nombre de cycles et laissant l'écart-type constant. Dans les tableaux précédents, on a testé 100 et 500 simulations, ci-après l'analyse est réalisée pour un nombre de cycles égal à 1000.

|                                                         |       |       |       |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| <b><math>\mu_{prior}</math> (moyenne) (m)</b>           | 11.3  |       |       |
| <b><math>\sigma_{prior}</math> (écart-type) (m)</b>     | 0.5   |       |       |
| <b>ID itération</b>                                     | V5    | V5b   | V5c   |
| <b>Nombre de cycles (Ncycles)</b>                       | 500   | 1000  | 100   |
| <b>MAP distribution a posteriori (m)</b>                | 11.58 | 11.83 | 11.1  |
| <b><math>\sigma_{posterior}</math> (écart-type) (m)</b> | 0.50  | 0.49  | 0.49  |
| <b>Q(H=13,58 m) (m³/s)</b>                              | 10728 | 10128 | 12892 |
| <b><math>\Delta Q/Q</math></b>                          | -17%  | -22%  | -1%   |

Tableau 20. A priori et a posteriori de b2 pour différents Ncycles et comparaison avec des débits obtenus

D'après les résultats, à mesure que le nombre de cycles augmentent, l'écart entre les débits est de plus en plus important par rapport au débit modélisé du Telemac. Est-il assez fiable la valeur du débit issu du modèle Telemac ? Est-ce que la MAP est la statistique à prendre après modélisation, mais y a-t-il certains cas d'étude où il faut privilégier autre statistique ? De toute façon, il faut retenir que l'inférence bayésienne vise plutôt à identifier une distribution optimale et que le MAP est seulement un estimateur.

#### ○ Répétabilité des résultats SPD :

Un manque de répétabilité des résultats SPD est apparu lorsque la même étude a été réalisée sans changement. En revanche, le problème ne se présente pas sur BaRatin autrement dit peu importe si l'étude se lance plusieurs fois, les résultats ne vont pas varier.

Michel s'est occupé de la première expérience, en établissant un Ncycle égal à 1000 et ensuite, à 100. Pour le premier cas,

trois itérations ont été faites, alors que pour la deuxième, il y en a eu quatre. Les résultats s'affichent ci-après :

|                                       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\mu_{prior}$ (moyenne) (m)           | 11.3  |       |       |       |       |       |       |
| $\sigma_{prior}$ (écart-type) (m)     | 0.5   |       |       |       |       |       |       |
| ID itération                          | V5b   | V5b2  | V5b3  | V5c   | V5c2  | V5c3  | V5c4  |
| Nombre de cycles (Ncycles)            | 1000  | 1000  | 1000  | 100   | 100   | 100   | 100   |
| MAP distribution a posteriori (m)     | 11.83 | 11.51 | 11.29 | 11.10 | 11.04 | 11.47 | 10.88 |
| $\sigma_{posterior}$ (écart-type) (m) | 0.49  | 0.50  | 0.49  | 0.49  | 0.50  | 0.52  | 0.48  |
| Q(H=13,58 m) (m³/s)                   | 10128 | 11119 | 11511 | 12892 | 11861 | 11688 | 12557 |
| $\Delta Q/Q$                          | -22%  | -14%  | -11%  | -1%   | -9%   | -10%  | -3%   |

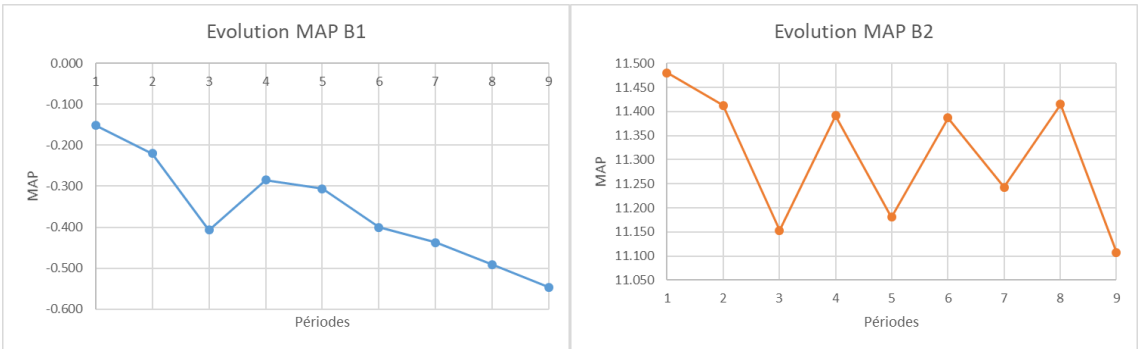
Tableau 21. A priori et a posteriori de b2 pour deux Ncycles et comparaison avec des débits obtenus sans changer la configuration initiale

Même si les fichiers de configuration n’ont pas été modifiés, d’un côté, les résultats a posteriori ne sont pas les mêmes que l’a priori et d’un autre côté, les résultats ne sont pas stables parmi les itérations, ce qui est plutôt étonnant.

Une deuxième étude de sensibilité a été mise en place où on revient à l’estimation des CT<sub>0</sub> via BaRatin. C’est pour cela qu’il est nécessaire d’extraire les périodes stables (les périodes où il n’y avait plus de découpage) pour étudier la CT proposée après segmentation.

| Période | Itération de la segmentation | b1      |         | b2      |         |
|---------|------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|         |                              | St.Dev. | MAP (m) | St.Dev. | MAP (m) |
| 1       | 4                            | 0.062   | -0.152  | 0.499   | 11.480  |
| 2       | 6                            | 0.068   | -0.220  | 0.510   | 11.412  |
| 3       | 7                            | 0.180   | -0.407  | 0.503   | 11.153  |
| 4       | 8                            | 0.024   | -0.285  | 0.504   | 11.392  |
| 5       | 11                           | 0.034   | -0.306  | 0.490   | 11.181  |
| 6       | 14                           | 0.036   | -0.400  | 0.497   | 11.387  |
| 7       | 15                           | 0.020   | -0.437  | 0.507   | 11.243  |
| 8       | 16                           | 0.026   | -0.491  | 0.493   | 11.415  |
| 9       | 17                           | 0.020   | -0.546  | 0.500   | 11.108  |

Tableau 22. A posteriori des paramètres b1 et b2 pour les périodes stables identifiées



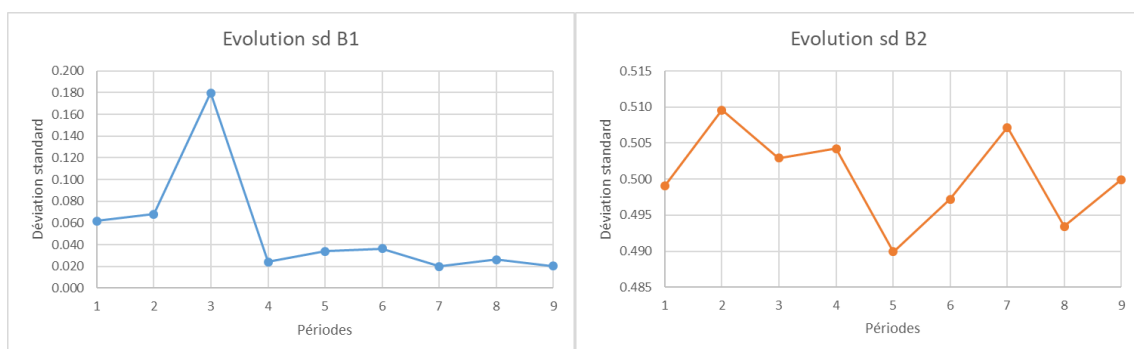


Figure 29. Evolution du paramètre « b » des deux contrôles hydrauliques à travers les périodes

A partir de l'information précédente, plusieurs conclusions peuvent s'en tirer. D'un côté, l'écart-type du paramètre b des deux contrôles reste plutôt stable : la variation n'est pas très importante à exception de la troisième période du contrôle à bas débit. En même temps, la variation d'une période à l'autre est plus marquée sur le deuxième contrôle.

D'un autre côté, l'estimation du MAP du paramètre b1 du contrôle à bas débit est la plupart du temps décroissant, ce qui indique des périodes de creusement en continu. Au contraire, le deuxième contrôle met en évidence une instabilité du MAP de b2, avec des changements plutôt forts à travers des périodes consécutives, ce qui indique une complexité de la géométrie et de la végétation du lit majeur réel, et les limitation et hypothèse que fait le modèle (canal rectangulaire prismatique).

Maintenant, on revient à nouveau sur BaRatin SPD en modifiant les valeurs de la moyenne et l'écart-type selon la dernière période stable identifiée précédemment dans l'estimation de la  $CT_0$  pour pouvoir comparer les deux études et en tirer des conclusions. C'est ainsi que les paramètres sont réglés comme  $b1 \sim N(-0.546, 0.02)$  et  $b2 \sim N(11.108, 0.5)$ . Le type de changements du lit vont affecter de manière globale et il a été supposé que les changements vont varier en moyenne 0 m, avec un écart-type de  $\pm 0.25$  m. Enfin, il n'y a que le paramètre b1 du lit mineur qui varie parmi les périodes.

L'étude se lance 4 fois avec un nombre de cycles fixé à 100. Les résultats se présentent dans le tableau suivant :

|                                            |        |       |       |       |
|--------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| $\mu_{prior}$ (moyenne) (m)                | 11.108 |       |       |       |
| $\sigma_{prior}$ (écart-type) (m)          | 0.5    |       |       |       |
| ID itération                               | V1     | V1b   | V1c   | V1d   |
| Nombre de cycles (Ncycles)                 | 100    | 100   | 100   | 100   |
| MAP distribution a posteriori (m)          | 11.40  | 10.62 | 11.09 | 11.07 |
| $\sigma_{posterior}$ (écart-type) (m)      | 0.5    | 0.52  | 0.52  | 0.49  |
| $Q(H=13,58 \text{ m})$ (m <sup>3</sup> /s) | 11815  | 13137 | 12290 | 12378 |
| $\Delta Q/Q$                               | -9%    | 1%    | -5%   | -5%   |

Tableau 23. A priori et a posteriori de b2 avec l'a priori de la dernière période et comparaison du débit

L'écart en débit a diminué et les écarts restent faibles pour l'évènement en question. D'ailleurs, ce qui interpelle est les différences parmi les itérations, car aucune information a été changée entretemps. Afin d'approfondir plus loin sur les simulations, l'intérêt d'analyser les traces et les distributions a posteriori pour chaque itération pour mieux cerner le problème. Les distributions qui s'affichent sur le présent rapport se concentrent seulement sur le paramètre b2 du deuxième contrôle. Toutefois, les résultats de tous les paramètres sont donnés en annexes.

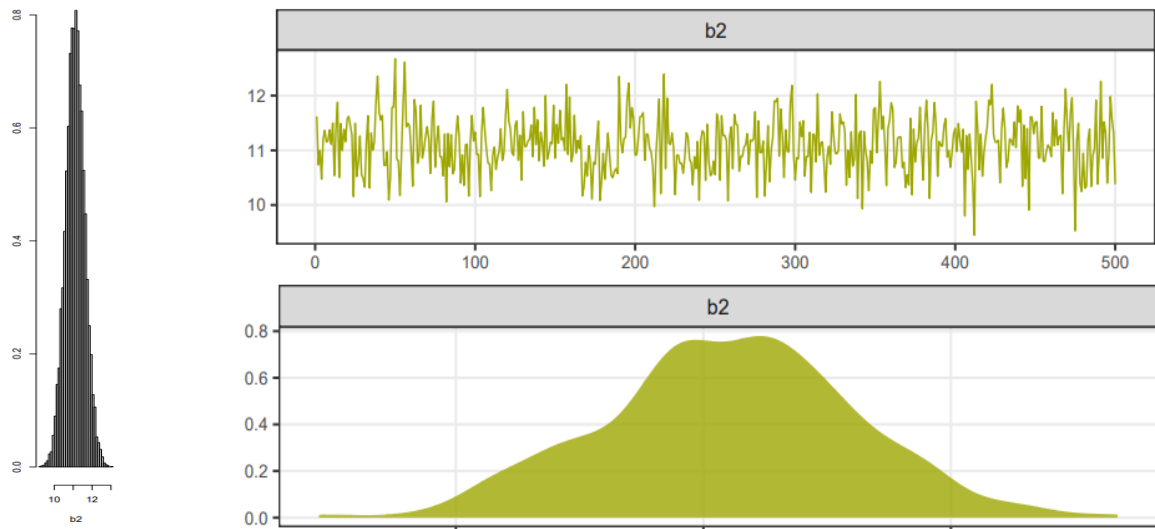


Figure 30. Distribution à priori à gauche, traces des simulations et distribution à posteriori de la première itération du SPD

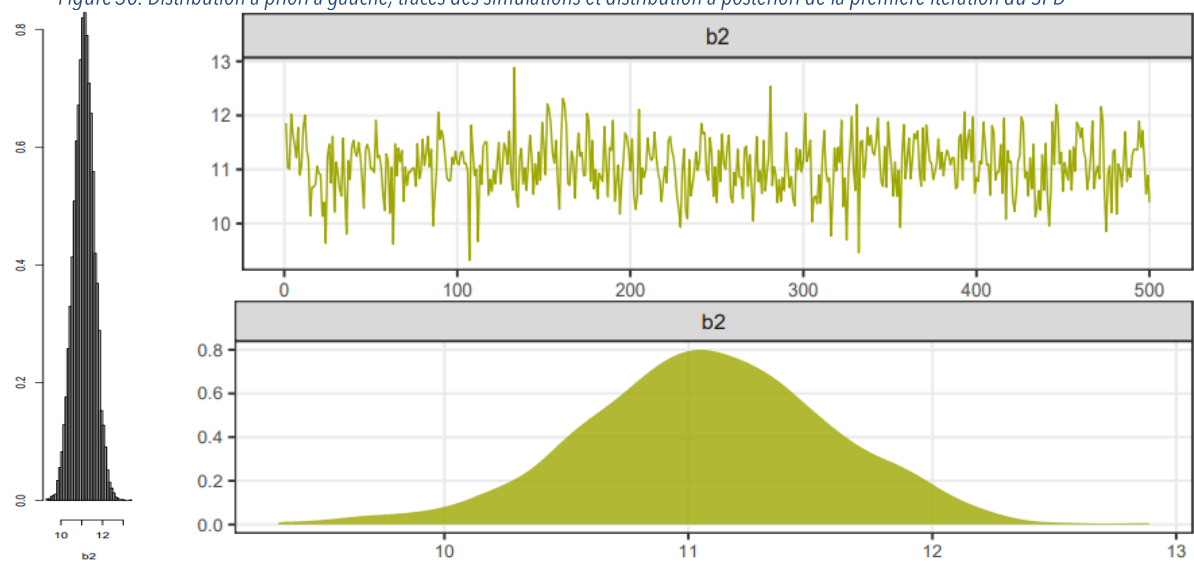


Figure 31. Distribution à priori à gauche, traces des simulations et distribution à posteriori de la deuxième itération du SPD

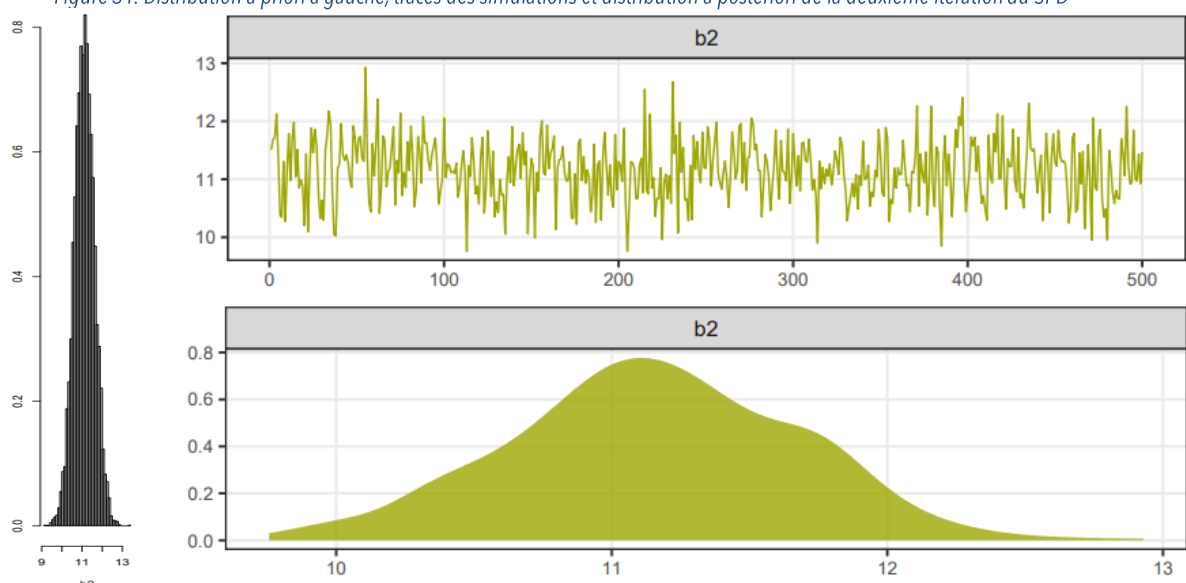


Figure 32. Distribution à priori à gauche, traces des simulations et distribution à posteriori de la troisième itération du SPD

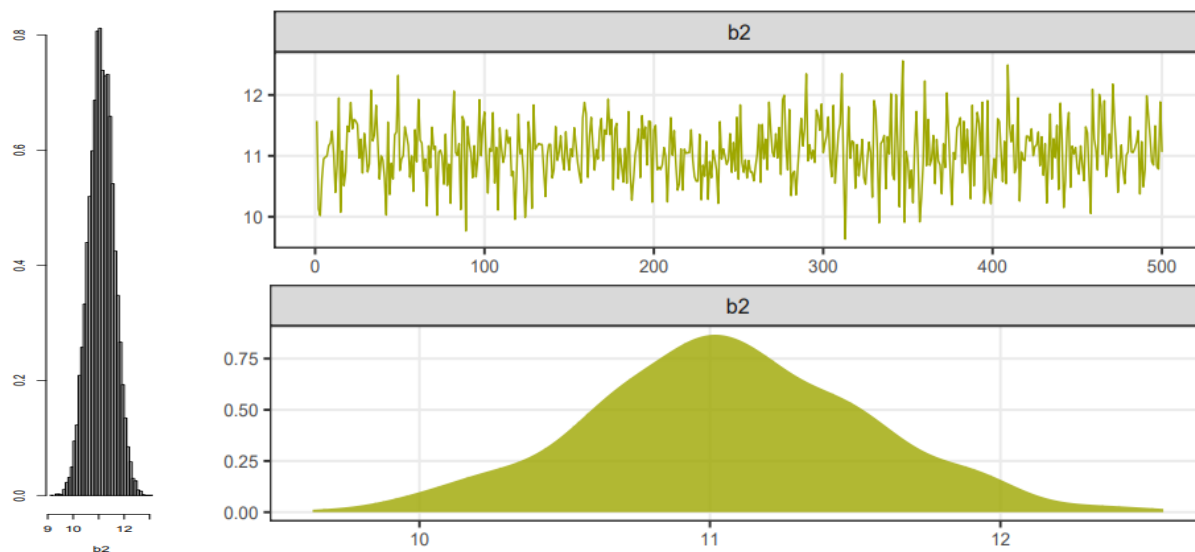


Figure 33. Distribution à priori à gauche, traces des simulations et distribution à posteriori de la quatrième itération du SPD

En théorie, les distributions a priori et a posteriori du paramètre devraient être similaire, mais ce qu'on observe est la réalisation n'est pas forcément la même et cela dépend de la machine et du langage de programmation génère les valeurs aléatoires.

○ **Solution :**

Fortran a par défaut la génération des valeurs aléatoire fixe sauf si l'utilisateur souhaite de changer. En revanche, puisque l'outil est codé sur R qui fait appel des modules Fortran, mais R génère les valeurs d'une distribution de façon aléatoire en suivant l'heure de la machine. C'est pourquoi les résultats ne sont pas répétables, sauf si l'utilisateur le fixe via la fonction sur R : `set.seed()`. C'est ainsi qu'on arrive à recréer les mêmes valeurs sur les distributions. De toute façon, un ticket sur la plateforme *BaM* a été effectué afin qu'un vecteur stocke la réalisation de la distribution a priori pour que l'utilisateur ait accès après calage ou propagation.

## 4. Perspectives 2023

La méthodologie de l'outil BayDERS est bien établie, mais il n'est pas entièrement simple à paramétrer. C'est pourquoi parmi les objectifs pour l'année à venir est de mettre à plat une par une les méthodes de segmentation, pour non seulement rendre l'outil plus opérationnel, mais aussi fixer des paramètres par défaut pour réduire la complexité du paramétrage.

La méthode de segmentation par jaugeages est la seule suffisamment bien stable, en termes de temps de calcul, mais à optimiser au niveau de réglage du paramétrage. En revanche, la méthode de segmentation par récession, ainsi que la méthode de transport solide ont besoin d'un changement plus approfondi. Afin d'arriver à l'opérationnalisation des méthodes, il faut intégrer l'utilisation du package *RBaM* sur R qui sert à l'écriture automatique des fichiers de configuration qui *BaM* aura besoin.

Parmi les stratégies à adopter pour le plan de travail sur l'année suivante, l'objectif est de retravailler depuis le début la méthode de segmentation, comme cas exploratoire pour avoir des possibles pistes qui peuvent faire avancer l'autres méthodes. Pour commencer, l'idée est de réaliser une première segmentation en utilisant le package *RBaM* pour créer un premier script en faisant le lien direct entre *BaM* (Fortran) et BayDERS (R).

Dans cette même perspective d'opérationnalisation de l'outil, quelques premiers travaux ont déjà commencé pendant l'action de cette année, mais il y aura besoin de plus de temps pour le rendre accessible auprès du réseau. De même, on vise d'avoir des avancées sur chaque méthode pour résoudre des problèmes concrets spécifiques à chaque type de segmentation.

- Segmentation à partir de l'étude des résidus des jaugeages avec leur incertitude à la courbe de tarage:

L'une des améliorations qui peut s'envisager est l'option d'analyse des résidus en termes relatifs au lieu d'absolus afin de laisser au choix de l'utilisateur. De même, l'un des points bloquants est l'estimation des a priori (notamment sur le résidu

moyen), c'est pourquoi il faudrait assister l'utilisateur dans tout le paramétrage, et avoir des options par défaut.

Etant donné que des zones de «sur segmentation» ont été détectées, des efforts devront être effectués afin d'adapter/modifier les critères de segmentation afin d'empêcher leur apparition.

L'approche SPD est une méthode qui en cours d'opérationnalisation et qui est stable.

- Analyse des récessions du limnigramme :

La méthode est bien établie, mais manque d'efficacité parce que les temps de calcul sont trop longs. Besoin d'étudier différents paramétrages pour détecter des paramètres qui peuvent être fixés. Réaliser une segmentation récursive comme la segmentation par jaugeages afin d'empêcher des fonctions de densité de probabilité très large et plates.

Parmi les avancées de la première étape, la plus importante à traiter est de modifier ou adapter la façon d'extraire les récessions afin de limiter la quantité de points à traiter lors de l'estimation des courbes de récession. De même, afin que les résultats soient performants, il faut imposer que les récessions soient les plus longues possibles. C'est pour cela que l'idée est de faire intervenir différents paramètres comme le chi et l'espacement maximal entre deux données consécutives pour trouver une relation qui permet d'avoir des récessions suffisamment longues.

Enfin, l'idée est d'améliorer la mutualisation des résultats issus des deux méthodes via une base plus mathématique pour réaliser un filtrage plus robuste.

- Analyse du transport solide :

L'analyse s'est effectuée principalement à la station de Meyras, au-delà de cette station, peu de stations ont été testées. Par conséquent, le but est de mettre en place l'étude sur d'autres cas d'étude pour mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de la méthodologie proposée pour l'analyse non seulement en temps réel, mais aussi en rétrospectif pour détecter de potentiels détarages ratés par les deux autres méthodes. En d'autres termes, pour lancer cette méthode, elle aura besoin de jaugeages (première méthode de segmentation) ou de récessions (deuxième méthode de segmentation).

## 5. Références

Benjamin, R. (2017). BaM ! (Bayesian Modeling): Un code de calcul pour l'estimation d'un modèle quelconque et son utilisation en prédiction. irstea, pp.90. hal-02606929

Benjamin, R., Le Coz, J., Blanquart, B., Bonnifait, L., (2015). Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en hydrologie. Applications à la prédétermination et à l'hydrométrie. France, pp.116. hal-02602443

Dariento, M. (2021). Detection and estimation of stage-discharge rating shifts for retrospective and real-time streamflow quantification. Hydrology. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2021. English. NNT:2021GRALU006 tel-03211343f

Dariento, M. (2021). Gestion en temps réel des stations hydrométriques à courbes de tarage instables (Action HYDROM A2-INRAE 2021). *Rapport technique convention SCHAPI/INRAE*, 75 pages.

Lang, M., Le Coz, J., Mendez-Rios, F. (2022). Expertise sur l'évaluation du débit de crue millénal sur la Garonne à Lamagistère. Phase 1: critique de données de débit de crue. *Rapport technique SCHAPI/EDF/INRAE*, 74 pages, novembre.

Mansanarez, V. (2016) Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties. *PhD Thesis*, Grenoble Alps University.

Rousseau, C. (2022). Elaboration des courbes de tarage du Sonnant au Pont de Venon. *DU : Document Utilisateur. Grenoble INP ENSE3*, 9 pages.



Centre siège Antony-Paris  
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques  
1, rue Pierre-Gilles de Gennes  
CS 10030  
92761 Antony Cedex  
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

[www.inrae.fr](http://www.inrae.fr)



**MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET DE LA COHÉSION  
DES TERRITOIRES**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**INRAE**